

## **Mémoire de fin d'études**

**présenté pour l'obtention du Diplôme Ingénieur Agronome  
Spécialité : Production Végétale Durable**

# **Gestion durable des systèmes agroforestiers à base de caféiers sous pression de bioagresseurs**



**par Charlotte NGO-DINH**

**Année de soutenance : 2013  
SYSTEM**

**Organisme d'accueil : CIRAD, UMR**

# **Mémoire de fin d'études**

**présenté pour l'obtention du Diplôme Ingénieur Agronome  
Spécialité : Production Végétale Durable**

## **Gestion durable des systèmes agroforestiers à base de caféiers sous pression de bioagresseurs**



**par Charlotte NGO-DINH**

**Année de soutenance : 2013**

**Mémoire préparé sous la direction de :  
Aurélie METAY**

**Organisme d'accueil : CIRAD, UMR  
SYSTEM**

**Présenté le : 14 Octobre 2013**

**devant le jury :**

**[Prénom NOM]**

**[Prénom NOM]**

**[Prénom NOM]**

**Maître de stage : Clémentine  
ALLINNE**

## Résumé

Les bioagresseurs étant un facteur limitant de la production de café au Costa Rica, les pesticides y sont utilisés de façon intensive. Dans ce contexte, un enjeu important est de maintenir la production de café, de manière durable. Une alternative aux pesticides serait le contrôle biologique des bioagresseurs. Nous posons ainsi l'hypothèse qu'il existe une relation entre la diversité biologique et la régulation des bioagresseurs, celle-ci pouvant peut-être être mise en évidence dans des milieux où il n'y a pas d'application de produits chimiques. Pour tenter d'identifier une telle relation, nous avons étudié un réseau de parcelles au Costa Rica. Ce réseau est composé de 14 parcelles dans lesquelles aucun contrôle chimique des maladies et ravageurs n'est réalisé, et qui représente un gradient de gestion et de diversité allant de la parcelle de gestion conventionnelle à la parcelle abandonnée depuis une vingtaine d'années en passant par diverses situations de gestion biologique. Dans chaque parcelle, de 4 à 24 variables ont été mesurées afin de caractériser leur topoclimat, pratiques culturales, caractéristiques physiques et physiologiques des caféiers, structure du peuplement végétal, diversité spécifique arborée ainsi que leur profil d'incidence de bioagresseurs. Une typologie a été effectuée pour chaque catégorie de variables et les associations entre les groupes identifiés lors de la typologie et les profils d'incidence des bioagresseurs ont été mises en évidence avec une analyse factorielle des correspondances. Les interactions de l'agroécosystème caféière ont été illustrées avec un modèle conceptuel. Nous observons que les profils d'incidence de bioagresseurs sont différents selon les situations (dont la diversité biologique) et le rendement. Trois situations associées à trois profils d'incidences de bioagresseurs sont observées : la situation des parcelles en usage avec peu de végétation associée, celle des parcelles abandonnées depuis peu dont la couverture arborée est intermédiaire et celles des abandonnées depuis longtemps dont la couverture arborée est très élevée. Il semblerait que la diversité intra-parcellaire et en bordure influe sur le niveau d'incidence des bioagresseurs par le biais des auxiliaires de culture et des plantes hôtes.

## Mots clés

Coffea arabica, topoclimat, pratiques culturales, structure végétale, diversité spécifique, profil d'incidence, régulation des bioagresseurs, typologie, Costa Rica.

## Abstract

The pests being a limiting factor for the coffee production in Costa Rica, pesticides there are used intensively. In this context, a vital issue is to maintain coffee production, in a sustainable manner. An alternative for pesticides would be biological pest control. We set the hypothesis that a relation exists between biological diversity and pest control mechanisms. This can be shown in pesticides free areas. In order to attempt to identify such a relation, we have studied a network of plots in Costa Rica. This network is composed of 14 free of any chemical pest control plots, which represents a management and diversity gradient varying from conventionally managed plots to plots abandoned for twenty years, through diverse cases of biologically managed plots. In each plot, from 4 to 24 variables have been measured in order to label it topo-climatic conditions, crop management patterns, physical and physiological coffee tree characteristics, vegetation structure, specific tree diversity, as well as pest damage profiles. A typology have been performed for each type of variables and the associations between the groups identified by the typology and the pest damage profiles have been shown with a factorial analysis of correspondence. The interactions between the agro-ecosystem of the coffee plantation have been illustrated by a conceptual model. We observed that pest damage profiles are different depending on the situation (including biological diversity) and the yield. Three situations associated with three pest damage profiles have been noted: the case of cultivated plots with a little associated flora, the situation of plots abandoned recently with an intermediate tree cover and the situation of plots abandoned for a long time with a strong tree cover. It seems that the diversity within and at the edge of the coffee plot influences pests incidence level through auxiliaries and host plants.

## Key words

*Coffea arabica*, topo-climatic conditions, crop management, vegetal structure, specific diversity, damage profile, pests regulation, typology, Costa Rica.

## Remerciements

Je tiens à remercier toute l'équipe de chercheurs du CIRAD au CATIE, très disponible pour me conseiller et pour me transmettre ses connaissances, et plus particulièrement Clémentine Allinne qui m'a bien encadrée.

Je remercie également Elias de Melo et Luiz Romero pour m'avoir aidée dans l'identification de ravageurs.

Je voulais aussi remercier toute la finca Monte Claro, Marie et Christian, mais aussi Tuly, Sergio et Cesar.

Enfin je remercie l'équipe enseignante de la spécialisation Production Végétale Durable de Montpellier SupAgro, et notamment Aurélie Metay pour ses nombreux conseils.

## Table des matières

Résumé .....	3
Abstract .....	4
Remerciements .....	5
Introduction .....	7
1.1. Contexte .....	7
1.2. Analyse bibliographique .....	8
1.3. Hypothèses et objectifs .....	10
2. Matériel et méthode .....	11
2.1. Zone d'étude .....	11
2.2. Echantillonnage .....	11
2.2. Mesures .....	12
2.2.1. Topoclimat .....	13
2.2.2. Caractéristiques physiques et physiologiques de caféier .....	13
2.2.3. Pratiques culturelles .....	13
2.2.4. Structure du peuplement végétal .....	14
2.2.5. Diversité spécifique arborée $\alpha$ et $\beta$ .....	16
2.2.6. Incidence des bioagresseurs sur les caféiers .....	16
2.2.7. Incidence des bioagresseurs sur les plants témoins .....	17
2.3. Analyses statistiques .....	18
2.3.1. Analyses descriptives .....	18
2.3.2. Analyses comparatives .....	18
3. Résultats .....	19
3.1. Description des typologies par catégories de variables .....	19
3.1.1. Topoclimat .....	19
3.1.2. Caractéristiques physiques et physiologiques des caféiers .....	19
3.1.3. Pratiques culturelles .....	20
3.1.4. Structure du peuplement végétal .....	21
3.1.5. Diversité spécifique $\alpha$ du peuplement arboré .....	22
3.1.6. Diversité spécifique $\beta$ du peuplement arboré .....	23
3.1.7. Profils d'incidence des bioagresseurs sur les caféiers .....	23
3.1.8. Profils d'incidence des bioagresseurs sur les témoins .....	24
3.2. Analyses Factorielles de Correspondances (AFC) .....	25
3.2.1. AFC pour les profils d'incidence des bioagresseurs sur les caféiers .....	25
3.2.2. AFC pour les profils d'incidence des bioagresseurs sur les plants témoins .....	27
4. Discussion .....	29
4.1. Résultats .....	29
4.1.1. AFC pour les profils d'incidence des bioagresseurs sur les caféiers .....	29
4.1.2. AFC pour les profils d'incidence des bioagresseurs sur les plants témoins .....	32
4.2. Méthodologie .....	32
4.2.1. Dispositif expérimental .....	32
4.2.2. Prise de mesures .....	33
4.2.3. Analyses statistiques .....	34
5. Conclusion .....	35
Références bibliographiques .....	37
ANNEXES .....	39
ANNEXE 1 .....	39
ANNEXE 2 .....	40



## Introduction

### 1.1. Contexte

« Environ 60% des services écosystémiques examinés par le (Millennium Ecosystem Assessment, 2005) ont été dégradés ou sont utilisés de façon non durable, dont l'eau potable, la pêche, la purification de l'air et de l'eau, la régulation du climat régional et local, les catastrophes naturelles et les bioagresseurs ». En particulier, les mécanismes naturels de contrôle des bioagresseurs ont été dégradés par l'usage des pesticides.

Aussi est préconisé « l'investissement dans, et la diffusion de la science de l'agriculture et la technologie qui puissent supporter l'augmentation nécessaire de production de nourriture sans compromis nuisibles impliquant l'usage excessif d'eau, de nutriments, ou de pesticides ».

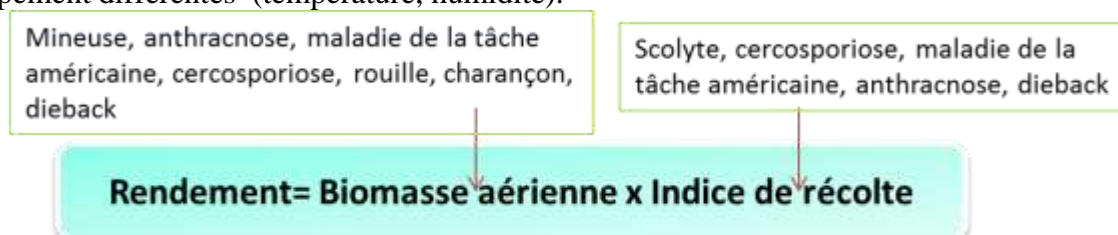
Il est donc nécessaire d'utiliser durablement des facteurs de production naturels comme le sol, la diversité biologique et l'eau (10 millions d'hectares de terres agricoles perdus chaque année) et de répondre à de nouvelles attentes de la société : préservation de la biodiversité, de l'environnement, produits plus durables,...

Une option serait la création de systèmes de cultures plurispécifiques permettant de maximiser le rendement tout en préservant l'environnement, selon le principe de l'intensification écologique de la production agricole. Celle-ci est définie par le fait de « piloter les processus biologiques des agroécosystèmes, et notamment les interactions biotiques, pour en optimiser l'exploitation et ainsi limiter l'usage des intrants par substitution ou en augmenter l'efficacité d'utilisation tout en maintenant ou en améliorant la productivité des cultures » (INRA, 2013).

Au Costa Rica, la production agricole représente 12% du Produit National Brut. Elle repose essentiellement sur le café, les bananes, les cultures à cycle court, l'élevage d'embouche et de laiterie, et les plantations de forêts (Pomerada, 2004). En 2011-2012 il a été recensé plus de 50 000 producteurs de café, présents sur 93 774 hectares, et produisant 614 948 tonnes de baies de café. 86.7% de ces baies sont exportées, ce qui représente environ 460 millions de USD (Instituto del café del Costa Rica, 2012) d'où l'importance de la culture du café pour ce pays.

Or, en général, la production est limitée par divers facteurs abiotiques et biotiques: le stress hydrique, la quantité insuffisante en éléments minéraux, les températures extrêmes, les adventices et les bioagresseurs (maladies et ravageurs).

Les bioagresseurs ont un impact sur la phase d'élaboration du potentiel de production du caféier (l'année n-1), et sur la phase de réalisation de ce potentiel (l'année n), le rendement d'une plante pérenne s'effectuant sur deux ans (Fig.1). Les pertes avant et après toutes récoltes confondues causées par l'ensemble des ravageurs sont estimées à environ 30%, le même pourcentage qu'au début du siècle (1999) (Silvy, 1995). Par ailleurs, les bioagresseurs du café sont nombreux...par exemple sont recensés au moins cinq ravageurs et une dizaine de maladies fongiques comme le montre le Tableau 1. Ils possèdent chacun des cycles de développement spécifique et ont des conditions optimales de développement différentes (température, humidité).



**Figure 1 Influence de certains bioagresseurs du caféier sur les composantes du rendement**

Au Costa Rica, les facteurs abiotiques sont peu limitant pour la production agricole (abondance en eau et chaleur), c'est pour cela que nous nous centrons sur les bioagresseurs.

De plus, il existe une diffusion des espèces (bioagresseurs inclus) de par le monde, toujours d'après le (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). « La distribution des espèces sur Terre devient de plus en plus homogène, c'est-à-dire que la composition en espèces de n'importe quelle région du monde devient plus similaire à la composition d'autres régions essentiellement dû à l'introduction d'espèces, intentionnellement ou non, par les voyages et le transport maritime ». Ceci est illustré au Costa Rica par l'importation de la rouille et du scolyte durant les trente dernières années (Staver et al., 2001).

Les bioagresseurs représentent donc un problème de plus en plus sévère pour la production du café (l'incidence de la rouille notamment est devenue très importante ces dernières années, surtout en 2012-2013 avec la crise de la rouille au Costa Rica (Instituto del café del Costa Rica, 2012)).

Pour limiter ce problème, et pour augmenter les rendements à court terme, les systèmes de cultures se sont intensifiés dans les années 70 (Perfecto et al., 1996), et ce de plusieurs manières :

- plantation de caféiers en plein soleil pour augmenter les rendements: moins ou pas d'arbres d'ombrage, ce qui entraîne une érosion des sols et une perte en matière organique et en biodiversité, et favorise certains bioagresseurs,
- introduction de variétés à haut rendement, résistantes à la rouille (comme le Catimor) mais qui sont aussi plus sensibles à d'autres maladies comme la maladie de la tâche américaine,
- utilisation de pesticides contre les adventices et les bioagresseurs, qui engendre de la pollution, des phénomènes de résistance, des effets négatifs sur la faune auxiliaire, une augmentation des coûts de production et nuit à la santé humaine. Ainsi, au Costa Rica, le problème majeur est l'usage massif de pesticides contre les bioagresseurs, surtout dans les plantations de bananes, de café et d'ananas (Chapagain K, 2011).

De ce fait, les systèmes de culture conventionnels du café ne sont pas une solution durable et pourraient favoriser certains bioagresseurs.

La problématique du café au Costa Rica est donc de pouvoir maintenir de bons rendements en café, culture de haute importance économique, tout en produisant durablement. Pour cela, la recherche de solutions alternatives aux pratiques actuelles du café conventionnel, innovantes et permettant une gestion intégrée du cortège de bioagresseurs, facteur limitant conséquent de la production de café, semble nécessaire.

## 1.2. Analyse bibliographique

Un système agroforestier est défini par une forme de pluriculture, remplissant trois conditions fondamentales : (i) au moins deux espèces végétales interagissent biologiquement, (ii) au moins une de ces deux espèces est une pérenne ligneuse et (iii) au moins l'une d'elle est cultivée pour le fourrage, ou la production annuelle ou pérenne (Somarriba, 1992). Traditionnellement, le café est cultivé dans des systèmes agroforestiers, dont la structure complexe et la flore diverse permettraient de réduire le nombre de bioagresseurs (Perfecto et al., 1996).

Dans ces systèmes, les arbres d'ombrage des caféiers forment un couvert dont la structure (organisation spatiale) influe sur le microclimat de la parcelle : elle tamponne les températures, augmente l'humidité, diminue la vitesse du vent et intercepte la lumière et la pluie (limite l'effet « splash » dispersant les spores). En conséquence, la phénologie du café, le cycle de vie des bioagresseurs et de leurs ennemis



sont modifiés (Beer et al., 1998). Toutefois, l'impact de l'ombrage sur le cortège de bioagresseurs est difficile à mettre en évidence. En effet, on observe des réponses antagonistes des bioagresseurs en fonction de l'ombrage (Tab.1).

**Tableau 1 Réponse des bioagresseurs à l'ombre selon la littérature**

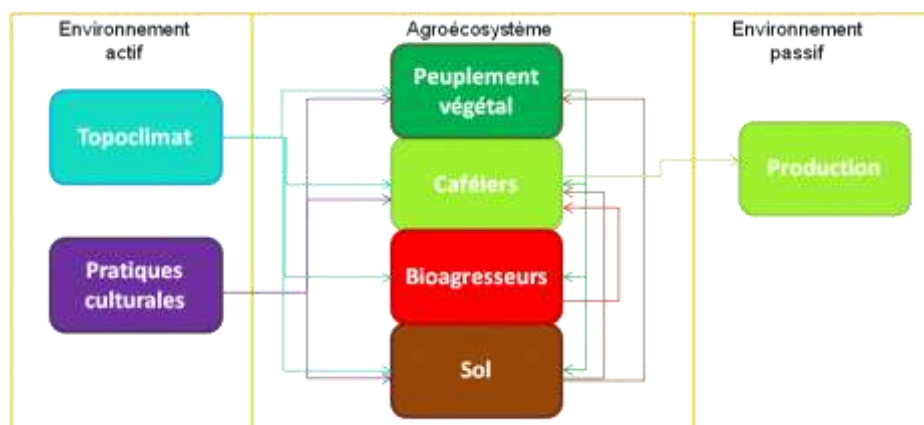
(Schroth et al., 2000)(Staver et al., 2001)(Herrera Sirias, 2011)

Type de bioagresseur	Nom latin	Favorisé par
<b>Ravageurs</b>	<i>Leucoptera coffeella</i>	Soleil
	<i>Planococcus citri</i>	Soleil
	<i>Meloidogyne incognita</i>	Soleil
	<i>Pratylenchus coffeae</i>	Ombre
	<i>Hypothenemus hampei</i>	Contradictoire (plutôt ombre)
<b>Champignons</b>	<i>Mycena citricolor</i>	Ombre
	<i>Cercospora coffeicola</i>	Soleil
	<i>Colletotrichum spp.</i>	Soleil
	<i>Hemileia vastatrix</i>	Ombre
	<i>Pellicularia koleroga</i>	Ombre
	<i>Phoma costaricensis</i>	Ombre
	<i>Corticium salmonicolor</i>	Ombre
	<i>Marasmius spp.</i>	Ombre
	<i>Fusarium spp.</i>	Soleil
	<i>Rosellinia spp.</i>	Soleil

De la même manière, l'effet de l'ombrage sur les auxiliaires de cultures est complexe. La végétation présente dans la caféière, de par sa diversité, offre un habitat et des ressources en pollen et en nectar pour les prédateurs et parasitoïdes des bioagresseurs, mais aussi peut être leur hôte alternatif.

Ainsi, l'influence du peuplement végétal sur les bioagresseurs semble contradictoire selon la littérature. Or, la plantation de caféiers est un agroécosystème complexe où il existe de nombreuses interactions, jamais étudiées dans leur ensemble, et pas seulement un effet du peuplement végétal sur la dynamique des bioagresseurs.

Les interactions entre les bioagresseurs et le peuplement végétal, le sol, le climat, leurs ennemis, les pratiques culturales, la physiologie du café (c'est-à-dire la situation de production)... sont à identifier (Fig.2), avant de pouvoir mettre en place des stratégies de contrôle intégré des bioagresseurs innovantes et durables. Pour cela, un bon outil permettant d'analyser de façon systémique des agroécosystèmes multifonctionnels et de voir la façon dont les variables sont liées est le modèle conceptuel (Lamanda et al., 2012).



**Figure 2** Représentation des interactions entre le topoclimat, les pratiques, le peuplement végétal, les caféiers, le sol et les bioagresseurs.

### 1.3. Hypothèses et objectifs

Dans ce contexte d'interrogation des effets de la flore associée aux caféiers sur le cortège de bioagresseurs, nous posons deux hypothèses.

Hypothèses :

H1 : La diversité biologique permettrait une meilleure régulation des bioagresseurs (Schroth et al., 2000).

H2 : Pour mettre en évidence les mécanismes naturels de régulation des bioagresseurs, s'il y en a, il faut les chercher dans des systèmes de culture dans lesquelles ces mécanismes ont pu se mettre en place, c'est-à-dire sans gestion des bioagresseurs (ex: pas d'insecticides).

Questions de recherche :

1. Existe-t-il des mécanismes de régulation des bioagresseurs *via* la diversité?
2. Où les mettre en évidence, c'est-à-dire dans quels types de situations les mécanismes de régulation naturelle des bioagresseurs se mettent en place?

Ainsi nous étudierons l'incidence du cortège de bioagresseurs du caféier dans différentes situations dans lesquelles il n'y a eu aucune régulation chimique (fongicide, insecticide) et contrastées au niveau de la structure et de la composition du peuplement végétal, afin de mettre en évidence de possibles mécanismes de régulation.

## 2. Matériel et méthode

### 2.1.. Zone d'étude

L'étude se situe dans l'exploitation Monte Claro, de la commune de Pavones, dans le canton de Turrialba et la province de Cartago, à environ 800 m d'altitude. Cette exploitation fait partie de la zone agro-écologique de Turrialba, dont l'altitude est comprise entre 600 et 900 m d'altitude et dont la température moyenne est comprise entre 25 et 27 °C (avec un pic en avril). S'y observe une forte pluviosité variable durant l'année (3979,6 mm/an) (Félix, 2010).

L'assolement de l'exploitation est constitué de 110 ha loués de canne-à-sucre, 27 ha de caféière abandonnée, 21 ha de caféière biologique, 3,5 ha de caféière conventionnelle, et de zones dispersées de reforestation et de conservation. Au total, l'exploitation s'étend sur 350 ha.

Il existe plusieurs types de pratiques culturales au niveau des caféières dans cette exploitation. Il y a la gestion :

- Conventionnelle : en plein soleil (taille des arbres d'ombrage), avec de la fertilisation, une gestion des bioagresseurs par pièges aux phéromones, des passages d'herbicide et la récolte.
- Biologique : ombragée, avec de la fertilisation, une gestion des bioagresseurs par pièges aux phéromones, un désherbage manuel, et la récolte
- Sans intervention : uniquement la récolte
- Conventionnel abandonné : avec les arbres en libre croissance, et diverses durées d'abandon
- Biologique abandonné : avec les arbres en libre croissance, et diverses durées d'abandon

L'objectif est d'obtenir une gamme de parcelles de situations de production contrastées à étudier, sans que n'influe la localisation et donc le climat et avec une faible variation d'altitude.

### 2.2.2. Echantillonnage

L'échantillonnage commence par une phase exploratoire de choix des parcelles au cours de laquelle est réalisé un tour des parcelles : l'altitude, la pente, la variété, l'historique de la parcelle, les pratiques culturales, la présence de bioagresseurs, la couverture végétale, et l'allure des caféiers en général sont relevés.

Puis vient la phase de tri des données permettant de choisir les parcelles en fonction de leur situation de production et notamment en fonction de la structure et de la composition du peuplement végétal. Pour cela sont choisies des parcelles conventionnelles et biologiques, en usage et à différents temps d'abandon. Quatorze parcelles sont retenues (Fig.3 et 4), les sous-parcelles seront décrites par la suite.

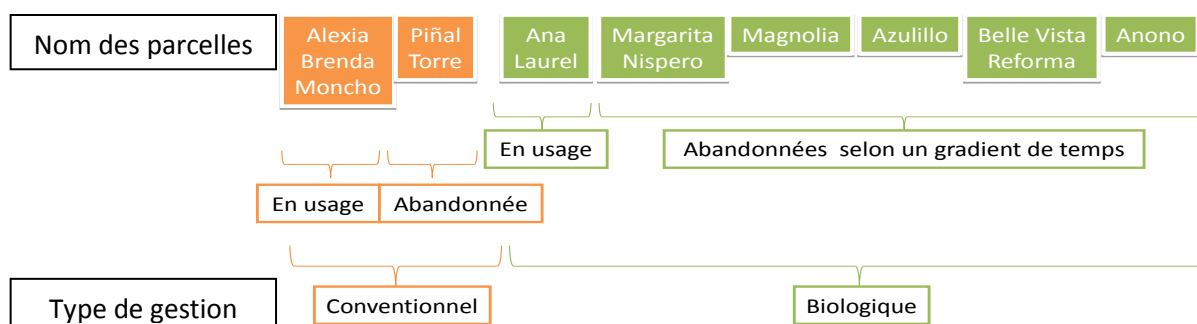
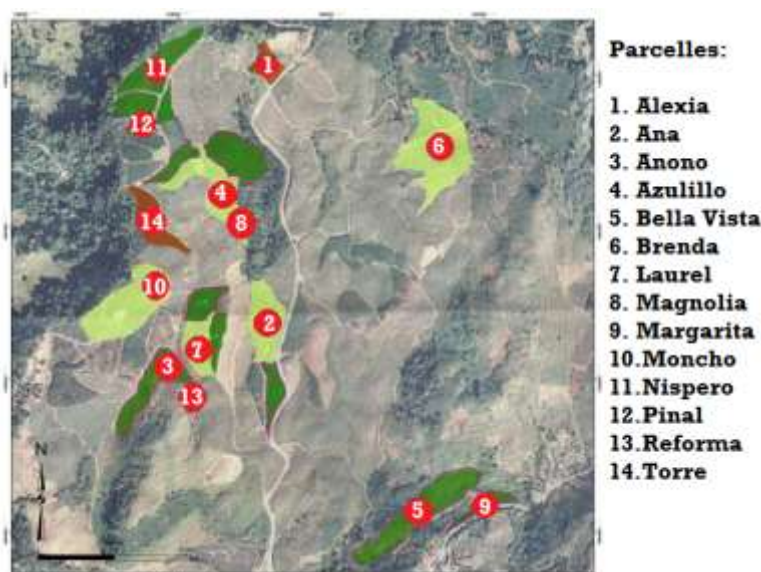


Figure 3 Méthode de choix des parcelles



adapté de (Félix, 2010)

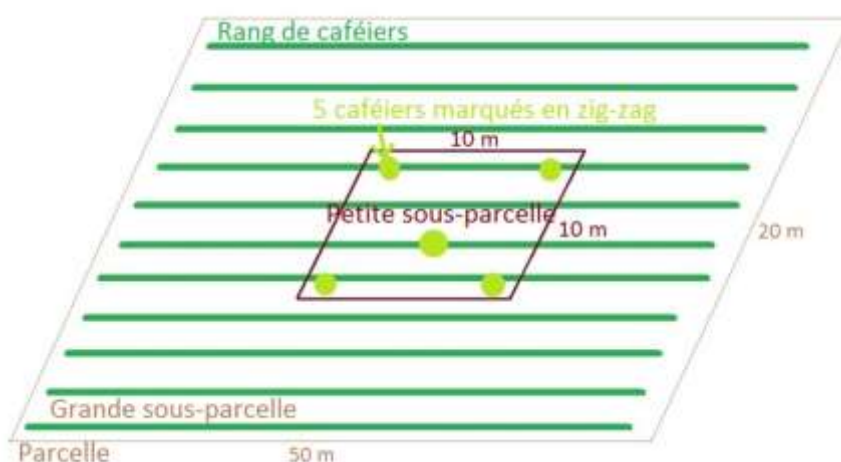
**Figure 4 Localisation des parcelles sur l'exploitation**

## 2.2. Mesures

L'objectif est de caractériser chaque parcelle selon le topoclimat, les pratiques culturales, le peuplement végétal, les caféiers, le sol et les bioagresseurs. Pour identifier et mesurer les variables pertinentes pour représenter chaque groupe de jeu de données une phase de mise au point de protocole expérimental a été nécessaire, ce travail ayant par la suite servi à la réalisation d'une autre étude sur « Les pratiques des producteurs biologiques comme source d'innovation pour la gestion des ravageurs et maladies du café » (ANNEXE 1).

Sur la partie la plus plane possible de chaque parcelle pour avoir le moins d'effet possible de la pente et de son orientation, une grande sous-parcelle de 50 x 20m est délimitée par des piquets, et à l'intérieur, une petite sous-parcelle de 10 x 10m est délimitée par des piquets, du ruban et géoréférencée selon un protocole adapté de (Deheuvels et al., 2012). Ce dispositif est illustré par la Figure 5.

Sur la grande sous-parcelle sont réalisées les mesures relatives au peuplement végétal (10 mesures par parcelle). Sur la petite sous-parcelle sont réalisées les mesures relatives aux caractéristiques physiques et physiologiques du caféier, les mesures étant faites sur 5 caféiers disposés en zig-zag, sur lesquels 3 rameaux sont marqués (inférieur, médian, supérieur), selon un protocole adapté de (Avelino et al., 2006).



**Figure 5 Schéma de la disposition des sous-parcelles**

### 2.2.1. Topoclimat

L'altitude de la parcelle est relevée au GPS, sa pente grâce au clinomètre et son orientation à la boussole. Les relevés de température et d'humidité relative se font en plaçant un ibutton (Maxims), qui est un capteur de température et d'humidité, au centre de chaque petite sous-parcelle, protégé par une gouttière réfléchissante, isolée par un maillage. Ces capteurs sont programmés pour prendre des mesures toutes les heures. Concernant le sol (pH, acidité, K, Ca, Mg, P, Cu, Zn, Mn, Fe), 15 échantillons de terre sont prélevés à la tarière, jusqu'à une profondeur de 30 cm (où il y a la majorité des racines du café), en zig-zag sur la petite sous-parcelle. Ils sont ensuite homogénéisés, 1 kilogramme de terre par parcelle est ensuite envoyé au laboratoire d'analyse de sol de l'Instituto del Café de Costa Rica. Les variables mesurées sont résumées dans le Tableau 2.

**Tableau 2 Récapitulatif des variables descriptives du topoclimat**

Variables du topoclimat	Code
Altitude (m)	altitude
Pente (°)	pente
Orientation : Est-Ouest/Nord-Sud (radians)	E.O et N.S
Température moyenne (°C)	Tmoy
Amplitude thermique (°C)	amplitude.T
Humidité relative moyenne (%)	RH
Amplitude de l'humidité relative (%)	amplitude.RH
pH (H <sub>2</sub> O)	pH
Acidité (cmol(+)/L) (KCl)	acidite
K, Ca, Mg, P, Cu, Zn, Mn, Fe (cmol(+)/L) (Olsen) (cmol(+)/L) (KCl) pour Ca	K, Ca, Mg, P, Cu, Zn, Mn, Fe

### 2.2.2. Caractéristiques physiques et physiologiques de caféier

Les variables retenues sont celles ayant montré leur intérêt sur le développement des bioagresseurs (Avelino et al., 2006). L'âge des caféiers est relevé par entretiens avec l'administratrice et le plus ancien des employés, ainsi qu'en consultant les registres de l'exploitation. La hauteur et le diamètre à la base des caféiers sont mesurés au décimètre.

Les variables mesurées sont résumées dans le Tableau 3.

**Tableau 3 Récapitulatif des variables descriptives des caractéristiques physiques et physiologiques des caféiers**

Variables des caractéristiques physiques et physiologiques du caféier	Code
Age (années)	Age
Hauteur (m)	Hauteur
Diamètre à la base (m)	diametre.base
Vigueur=hauteur/diamètre	Vigueur
Nb de tiges orthotropes	nb.tige.orthotrope
Densité foliaire=nombre de jeunes feuilles par rameau	dens.foliaire
Nombre de noeuds fructifères	nb.nds.fructif

### 2.2.3. Pratiques culturales

La variété, la durée d'abandon et la fréquence de passages de fertilisation, d'herbicides, de désherbage manuel et de taille sont relevés par entretiens avec l'administratrice et le plus ancien des employés ainsi qu'en consultant les registres de l'exploitation. La couverture arborée est mesurée au-dessus des cinq pieds marqués, en direction des quatre points cardinaux grâce au densitomètre hémisphérique (Lemmon, 1957). Les variables mesurées sont résumées dans le Tableau 4.

**Tableau 4 Récapitulatif des variables descriptives des pratiques culturales**

Variabes des pratiques culturales	Code
Nombre de pieds/trou	nb.plant.par.trou
Densité relative du café (/ha) =nombre de trous x nombre de pieds/trou	dens.relative.cafe
Variété principale	catimor, catuai.amarillo, catuai.rojo, caturra
Résistance à la rouille	resistante, sensible
Présence de taille du café	taille, pas.taille
Durée de l'abandon (années)	duree.abandon
Fréquence de fertilisation (/an)	F.fertilisation
Fréquence de passage d'herbicide (/an)	F.herbicide
Fréquence de désherbage manuel (/an)	F.desherbage.manuel
Fréquence de taille des arbres (/an)	F.taille.arbres
Couverture arborée (%)	couv.arboree

#### 2.2.4. Structure du peuplement végétal

Le protocole a été mis au point à partir des travaux de (Deheuvels et al., 2012). Le but est de caractériser la structure horizontale et verticale du peuplement végétal de la parcelle au sol et sur les caféiers (en dehors des arbres). Il s'agit d'estimer visuellement l'abondance des formes de croissances (lianes, épiphytes, mousses, fougères, ligneux, herbacées monocotylédones et dicotylédones, litière et sol nu) dans la strate comprise entre 0 et 1m de hauteur, et celle comprise entre 1 et 4m, sur 10 quadrats de 1m<sup>2</sup> disposés en zig-zag pour couvrir la grande sous-parcelle. Un des côtés du quadrats est disposé sur le rang afin d'avoir les épiphytes et les mousses prises en compte comme illustré par la Figure 6. L'estimation visuelle se fait en projetant mentalement la surface des végétaux au sol puis en classant les types en 3 classes : 0 (absence), 1 (1-33% de surface), 2 (34-66%) et 3 (67-100%).

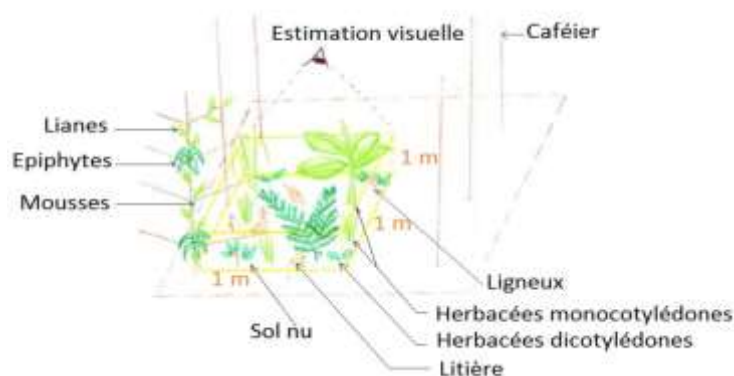
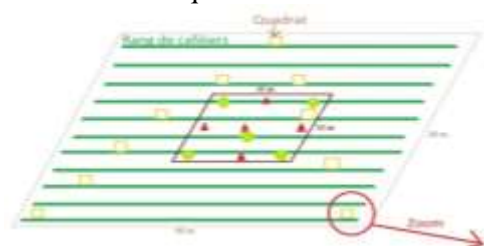
Un indice synthétique d'abondance de groupe est calculé, en adaptant la méthode de (Avelino et al., 2007) :

$$Ia = \sum_{i=0}^3 \frac{i \times ni}{3 \times N}$$

N= nombre de mesures total sur la parcelle

i : classe d'abondance

ni= nombre de quadrats notés i dans l'échelle d'abondance.



**Figure 6 Dispositif expérimental de mesure de la structure horizontale des types de végétation**



Il s'agit aussi de caractériser le peuplement arboré.

La structure horizontale est caractérisée en mesurant la couverture végétale en 10 points de la parcelle disposés en zig-zag. L'écart-type des valeurs de couverture donne un indice d'hétérogénéité de l'ombrage, donc de la disposition des arbres (plus l'écart-type augmente, plus l'ombrage est hétérogène). Par ailleurs, le rapport entre le nombre d'arbres plantés par le nombre d'arbres total (plantés et spontanés) donne un indice d'ordonnement de la parcelle, les arbres plantés l'étant en ligne.

Pour caractériser la structure verticale, un protocole expérimental est mis au point en adaptant la méthode de (Thiollay, 1992) à nos grandes sous-parcelles (Fig.7). Le nombre d'arbres selon diverses strates de hauteur est relevé : de 2 à 9m (sous-bois bas), de 10 à 20m (sous-bois haut), de 20 à 30m (canopée basse) et supérieure à 30m (canopée haute). La hauteur est mesurée au clinomètre et puis par estimation visuelle.

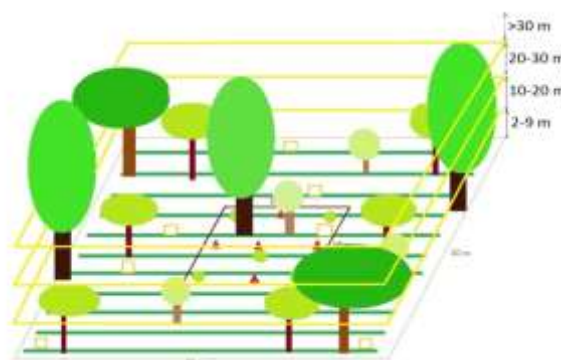


Figure 7 Dispositif expérimental pour caractériser la structure verticale arborée

Les variables mesurées sont résumées dans le Tableau 5.

**Tableau 5 Récapitulatif des variables descriptives de la structure du peuplement végétal**

Variables de la structure du peuplement végétal	Code
Sol nu	sol.nu
Litière	litier
Herbacées monocotylédones	herb.monocot.0.1m herb.monocot.1.4m
Herbacées dicotylédones	herb.dicot.0.1m herb.dicot.1.4m
Mousses	mousse0.1m mousse.1.4m
Ligneux	ligneux.0.1m ligneux.1.4m
Fougères	fougere.0.1m fougere.1.4m
Epiphytes	epiph.0.1m epiph.1.4m
Lianes	liane.0.1m liane.1.4m
Nombre d'arbres	nb.arbre
Couvert inférieur : pourcentage d'arbres entre 2-9 m	X.arbre2.9m
Couvert supérieur : pourcentage d'arbres entre 10-20 m	X.arbre10.20m
Canopée basse : pourcentage d'arbres entre 20-30 m	X.arbre20.30m
Canopée haute : pourcentage d'arbres entre >30 m	X.arbre30m
Couverture de la végétation à 1m du sol	couv.1m
Hétérogénéité de la couverture à 1m du sol	heterogeneite.ombre
Indice d'ordonnement des arbres	i.ordonnement

### 2.2.5. Diversité spécifique arborée $\alpha$ et $\beta$

Les arbres ont aussi été identifiés pour chacune des parcelles.

La diversité  $\beta$  permet de comparer la diversité spécifique entre plusieurs environnements, en comparant le nombre d'espèces uniques entre chacun des agroécosystèmes (Thibaut, 2009). L'indice de Sorensen caractérise ce type de diversité, il compare les parcelles deux à deux selon la formule suivante :

$$\frac{2c}{S_i + S_j}$$

$S_i$  = nombre d'espèce dans la parcelle i

$S_j$  = nombre d'espèces dans la parcelle j

c = nombre d'espèces communes entre les 2 parcelles

La diversité  $\alpha$  est définie par la richesse des espèces au sein d'un écosystème local (Thibaut, 2009). Elle est caractérisée par le nombre d'espèces d'arbres plantés, le nombre d'espèces d'arbres poussant spontanément, l'indice de Shannon et l'indice de régularité.

L'indice de Shannon reflète la difficulté à prédire l'identité du prochain individu, et donne plus de poids aux espèces rares. Il est calculé grâce à la formule suivante :

$$H' = - \sum p_i \times \log^2 p_i$$

$$p_i = \frac{n_i}{N}$$

$n_i$  = nombre d'individus de l'espèce i

N = nombre total d'individus

L'indice de régularité mesure la régularité de la distribution des espèces. Il est compris entre 0 et 1. S'il est égal à 1, alors toutes les espèces de l'échantillon sont également représentées. Il est calculé grâce à la formule suivante:

$$\text{Indice de régularité} : \frac{H'}{H'_{\max}}$$

Les variables mesurées sont résumées dans le Tableau 6.

**Tableau 6 Récapitulatif des variables descriptives de la diversité spécifique**

Variables sur la diversité spécifique	Code
Indice de Sorensen	Sorensen
Nombre d'espèces d'arbres plantées	nb.esp.plante
Nombre d'espèces d'arbres spontanées	nb.esp.spontane
Indice de Shannon	shannon
Indice de régularité	regularité

### 2.2.6. Incidence des bioagresseurs sur les caféiers

Selon la méthode de (Avelino et al., 2007), sur les 5 caféiers marqués, pour les huit bioagresseurs rencontrés dans les parcelles est relevé le pourcentage de feuilles atteintes par chaque bioagresseur sur les 3 rameaux.

Pour *Mycena citricolor* 50 plants de la petite sous-parcelle (et des alentours s'il n'y en pas assez) sont évalués avec une note de 0 à 3 selon la sévérité de la maladie (dieback, *Mycena citricolor*, *Phoma costaricensis* Echandi). Les critères selon lesquels on attribue une note sont:

0 = pied sain

1 = pied à peine attaqué (1-5%)

2 = pied modérément attaqué (6-25%)

3 = pied sévèrement attaqué (51-100%)

L'indice d'attaque (Ia) synthétique entre 0 et 1 reflète l'intensité de l'attaque à l'échelle parcellaire. Il est calculé pour chaque maladie selon la formule suivante (Avelino et al., 2007):









$$Ia = \sum_{i=0}^3 \frac{i \times n_i}{3 \times N}$$

N= nombre de caféiers dans la parcelle

$n_i$ = nombre de caféiers noté  $i$  dans l'échelle d'attaque.

5 campagnes de mesures sont réalisées au total, chacune en fin de mois. L'indice d'incidence maximal de chaque bioagresseur est gardé pour l'analyse des données. Les variables mesurées sont résumées dans le Tableau 7.

**Tableau 7 Récapitulatif des variables descriptives de l'incidence des bioagresseurs sur les caféiers**

Variables sur l'incidence des bioagresseurs sur les caféiers	Code	Photographie
<i>Hemileia vastatrix</i> =rouille	hemileia.vastatrix	
<i>Mycena citricolor</i> =maladie de la tâche américaine	mycena.citricolor	
<i>Cercospora coffeicola</i> =cercosporiose	cercospora.coffeicola	
<i>Leucoptera coffeella</i> =mineuse	leucoptera.coffeella	
<i>Colletotrichum coffeanum</i> =anthracnose	colletotrichum.coffeanum	
<i>Pantomonus spp</i> = charançon (Romero, 2013)	pantomonus.spp	
<i>Hypothenemus hampei</i> =scolyte	hypothenemus.hampei	
Dieback	dieback	

### 2.2.7. Incidence des bioagresseurs sur les plants témoins

Certaines parcelles choisies sont plantées avec des variétés résistantes à la rouille (Catimor), ce qui fausse les incidences de bioagresseurs des caféiers. C'est pour cela que 5 plants de caféiers témoins par parcelle sont plantés, de variété sensible à toutes les maladies : Caturra. Les témoins sont plantés sains car traités à la pépinière avant plantation, et les feuilles possiblement infectées sont retirées (Tixier,

2013). Le pourcentage de feuilles touchées par chaque bioagresseurs est relevé, comme pour les caféiers (sans le scolyte car il n'y a pas encore de production de grains, ni le dieback, absent). 4 campagnes de mesure sont menées. L'indice d'incidence maximal de chaque bioagresseur est gardé pour l'analyse des données.

### 2.3. Analyses statistiques

On réalise les analyses statistiques grâce au logiciel R, à l'aide des packages ade4 et FactoMiner.

#### 2.3.1. Analyses descriptives

Premièrement, les variables sont catégorisées et simplifiées. Puis, chaque base de données doit être décrite (topoclimat, caractéristiques physiques et physiologiques du caféier, pratiques culturales, structure du peuplement végétal, diversité  $\beta$ , diversité  $\alpha$ , incidence des bioagresseurs des caféiers, incidence des bioagresseurs des plants témoins), en réalisant une typologie des parcelles. Pour cela, une analyse multivariée (Analyse en Composantes Principales (ACP) pour les variables quantitatives, et Analyse Factorielle Mixte (AFM) pour les variables mixtes) est appliquée sur les variables. Ce type d'analyse permet de traiter simultanément plusieurs variables (Lemelin, 2004). Cette analyse factorielle est réalisée dans le but de réduire les données. Le nombre de dimensions est choisi de façon à pouvoir expliquer au moins 65% de l'inertie, puis les coordonnées des parcelles sur les axes de dimension sont enregistrées. A partir de ces coordonnées, une matrice de distance est établie, illustrée par la construction d'un dendrogramme. Cela permet de regrouper les parcelles selon leur similarité : c'est la typologie. Les groupes sont caractérisés en testant les variables qui les discriminent (tests de Kruskal-Wallis pour les variables quantitatives, et de  $\chi^2$  pour les qualitatives). Une fois les typologies réalisées, les groupes sont décrits selon les variables significatives et d'intérêt.

#### 2.3.2. Analyses comparatives

Par ailleurs, nous cherchons à établir des relations entre les groupes des situations de production et les incidences de bioagresseurs. Pour cela, des tests de Mantel sont effectués afin d'examiner le lien entre les matrices de distances deux à deux (réalisées précédemment) (Chessel, 2009).

Enfin, les groupes des diverses typologies sont représentés grâce à une Analyse Factorielle des Correspondances (AFC), qui permet de mettre en évidence les relations entre les différents groupes en les associant. Les indices de production (nombre de nœuds fructifères/pied x nombre de pieds sur la parcelle) sont ajoutés à l'AFC en tant que variables supplémentaires. Les groupes des typologies sont associées significativement en réalisant une typologie sur les axes de l'AFC.

### 3. Résultats

#### 3.1. Description des typologies par catégories de variables

Cette partie décrit les groupes obtenus par les typologies. Les groupes sont décrits en les comparant les uns aux autres. Les cercles de corrélation et dendrogrammes des analyses statistiques descriptives sont disponibles dans l'Annexe 2.

##### 3.1.1. Topoclimat

Le tableau 8 décrit les groupes de topoclimat.

**Tableau 8 Description des groupes de topoclimat**

N=Nord, S=Sud, K=Potassium, Tmoy=Température moyenne, RH=Humidité relative,  $\Delta T$ =Amplitude de température,  $\Delta RH$ =Amplitude d'humidité relative, Ca=Calcium, P=Phosphore, Cu=Cuivre, \*=variable significative ( $p < 0.05$ ).

Groupe		N	S	K	Tmoy	RH	$\Delta T$	$\Delta RH$	Ca	P	Cu
Topo 1	moyenne 1	0,48	0,14	0,10	22,54	93,07	18,24	62,37	2,22	4,55	16,25
	écart-type 1	0,55	0,27	0,00	0,14	1,09	1,72	4,45	1,13	0,73	6,29
	min 1	0,00	0,00	0,10	22,37	91,88	16,36	56,61	1,19	3,70	7,00
	max 1	0,99	0,54	0,10	22,68	94,52	20,30	66,30	3,83	5,30	21,00
Topo 2	moyenne 2	-	0,41	0,10	21,34	97,03	9,76	33,78	3,30	3,90	14,00
	écart-type 2	-	0,41	0,00	0,25	1,07	1,39	4,93	2,54	0,80	5,83
	min 2	-	0,00	0,10	21,06	95,57	8,39	27,87	0,40	3,10	4,00
	max 2	-	0,96	0,10	21,61	98,16	11,94	40,80	6,10	4,80	18,00
Topo 3	moyenne 3	0,68	-	0,14	21,40	97,57	10,74	37,64	5,98	6,42	22,80
	écart-type 3	0,40	-	0,06	0,17	0,70	1,77	5,05	1,28	1,15	2,39
	min 3	0,00	-	0,10	21,22	96,73	8,38	31,24	4,41	5,30	20,00
	max 3	0,91	-	0,23	21,59	98,61	12,83	42,92	7,65	7,90	26,00
Significativité		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

Topo 1 est caractérisé par de fortes amplitudes de température et d'humidité relative. Sa température moyenne est plus élevée que celle des autres groupes. Sa pente est orientée au Nord et son sol contient de faibles quantités de calcium.

Topo 2 présente de faibles amplitudes de température et d'humidité. Sa pente est orientée vers le Sud. Son sol contient de faibles quantités de cuivre et de phosphore.

Topo 3 est aussi caractérisé par de faibles amplitudes de température et d'humidité. Sa pente est orientée au Nord. Son sol contient de grandes quantités de cuivre, phosphore et calcium.

##### 3.1.2. Caractéristiques physiques et physiologiques des caféiers

Le tableau 9 décrit les groupes de relatifs aux caractéristiques des caféiers.

**Tableau 9 Description des groupes de caractéristiques physiques et physiologiques des caféiers**

diametre.base=diamètre à la base du tronc principal, vigueur=hauteur/diamètre, nb.tiges.orthotropes=nombre de tiges orthotropes du caféier, dens.folaire=nombre de jeunes feuilles par rameau, nb.nds.fructif=nombre de noeuds fructifères par caféier, \*=variable significative ( $p < 0.05$ ), NS=non significatif.

Groupe		diametre. base	vigueur	nb.tiges. orthotropes	dens.foliaire	nb.nds.fructif
Physio 1	moyenne 1	0,25	10,21	7,33	5,02	31,53
	écart-type 1	0,01	0,98	1,62	1,31	24,78
	min 1	0,25	9,25	6,40	3,53	3,00
	max 1	0,26	11,21	9,20	6,00	47,60
Physio 2	moyenne 2	0,20	13,38	4,04	4,61	40,04
	écart-type 2	0,03	1,72	0,26	0,90	70,08
	min 2	0,17	11,03	3,60	3,80	0,60
	max 2	0,23	15,47	4,20	6,13	164,80
Physio 3	moyenne 3	0,21	8,65	6,90	6,37	315,60
	écart-type 3	0,01	1,45	0,71	1,93	83,72
	min 3	0,20	7,63	6,40	5,00	256,40
	max 3	0,22	9,68	7,40	7,73	374,80
Physio 4	moyenne 4	0,10	23,54	3,95	5,00	118,95
	écart-type 4	0,03	7,99	2,07	1,26	105,22
	min 4	0,07	15,69	2,00	3,53	0,00
	max 4	0,13	33,70	6,20	6,27	208,00
Significativité		*	*	*	NS	NS

Les caféiers de Physio 1 présentent un faible nombre de nœuds fructifères mais un nombre de tiges orthotropes élevé. Ils présentent une bonne vigueur, avec un diamètre à la base assez important.

Physio 2 est caractérisé par des caféiers ayant un faible nombre de nœuds fructifères et de tiges orthotropes. Ils ont une densité foliaire faible.

Dans le groupe Physio 3, les caféiers produisent beaucoup de nœuds fructifères, de tiges orthotropes, et ont une forte densité foliaire. Ce sont des arbres vigoureux.

Les caféiers de Physio 4 produisent un peu de nœuds fructifères mais peu de tiges orthotropes. Ils sont caractérisés par un très petit diamètre et sont très peu vigoureux.

### 3.1.3. Pratiques culturales

Les tableaux 10 et 11 décrivent les groupes de relatifs aux pratiques culturales.

**Tableau 10 Description des groupes de pratiques culturales (variables quantitatives)**

duree.abandon=Durée d'abandon de la parcelle, dens.relative.cafe=nombre de caféiers sur la grande sous-parcelle, F.fertilisation=nombre de passages de fertilisation par an, F.desherbage.manuel=nombre de passages de désherbage manuel par an, F.herbicide=nombre de passages d'herbicide par an, couv.arboree=couverture des arbres au-dessus des caféiers, \*=variable significative ( $p<0.05$ ), \*\*= $p<0.01$ , NS=non significatif.

Groupe		duree. abandon	dens.relative. cafe	F.fertilisation	F.desherbage. manuel	F.herbicide	couv.arboree
Prat 1	moyenne 1	-	0,97	1,40	3,20	2,20	40,20
	écart-type 1	-	0,01	0,55	1,30	2,68	22,34
	min 1	-	0,96	1,00	2,00	0,00	20,00
	max 1	-	0,99	2,00	5,00	6,00	74,00
Prat 2	moyenne 2	1,67	0,96	-	-	-	73,00
	écart-type 2	1,15	0,04	-	-	-	34,60
	min 2	1,00	0,91	-	-	-	34,00
	max 2	3,00	0,99	-	-	-	100,00
Prat 3	moyenne 3	8,00	0,87	-	-	-	84,00
	écart-type 3	6,90	0,11	-	-	-	35,42
	min 3	2,00	0,68	-	-	-	12,00
	max 3	20,00	0,97	-	-	-	100,00
Significativité		**	*	**	**	*	NS



**Tableau 11 Description des groupes de pratiques culturales (variables qualitatives)**

Catimor, Caturra, Catuai rojo, Catuai amarillo=noms de variétés de caféiers, Taille=présence de taille des caféiers, Pas de taille=absence de taille des caféiers, \*=variable significative ( $p<0.05$ ), \*\*\*= $p<0.001$ .

%	Catimor	Caturra	Catuai rojo	Catuai amarillo	Taille	Pas de taille
Prat 1	0.4	0.2	0.2	0.20	1	0
Prat 2	0	0	1	0.00	0	1
Prat 3	0.17	0.83	0	0.00	0	1
Significativité	*	*	*	*	***	***

Prat 1 est caractérisé par des parcelles en usage (non abandonnées), une couverture arborée faible, et par des opérations culturales (passages d'herbicide, de désherbage manuel, de fertilisation, de taille des caféiers). La densité relative des caféiers y est forte et leurs variétés sont diverses.

Dans Prat 2, les parcelles sont abandonnées depuis peu (un peu plus d'un an) donc il n'y a aucune opération culturale. La densité relative du café y est élevée et la couverture arborée intermédiaire (les arbres ne sont plus taillés). Y est plantée uniquement la variété Catuai rojo.

Prat 3 comprend des parcelles abandonnées depuis longtemps, donc sans plus aucune opération culturale. La couverture arborée y est forte (arbres poussant spontanément et en libre croissance), et la densité relative des caféiers assez faible. Ce groupe contient surtout des plants de variété Caturra.

### 3.1.4. Structure du peuplement végétal

Le tableau 12 décrit les groupes de structure de la végétation associée aux caféiers.

**Tableau 12 Description des groupes de variables de structure du peuplement végétal**

Fougere0.1m=abondance de fougères entre 0 et 1 m de hauteur, fougere1.4m=abondance de fougères entre 1 et 4 m, ligneux0.1m=abondance de ligneux entre 0 et 1 m, mousse1.4m=abondance de mousses entre 1 et 4 m, liane1.4m=abondance de lianes entre 1 et 4 m, epiph1.4m=abondance d'épiphytes entre 1 et 4 m, \*=variable significative ( $p<0.05$ ), NS=non significatif.

Groupe		fougere0.1m	fougere1.4m	ligneux0.1m	mousse1.4m	liane1.4m	epiph1.4m
Struct 1	moyenne 1	-	-	0,03	-	0,02	-
	écart-type 1	-	-	0,03	-	0,04	-
	min 1	-	-	0,00	-	0,00	-
	max 1	-	-	0,07	-	0,07	-
Struct 2	moyenne 2	0,33	0,11	0,13	0,30	0,23	0,08
	écart-type 2	0,20	0,09	0,10	0,07	0,07	0,06
	min 2	0,07	0,00	0,03	0,20	0,17	0,03
	max 2	0,53	0,20	0,27	0,33	0,33	0,17
Struct 3	moyenne 3	0,08	0,02	0,43	0,33	0,35	0,23
	écart-type 3	0,02	0,02	0,05	0,00	0,02	0,09
	min 3	0,07	0,00	0,40	0,33	0,33	0,17
	max 3	0,10	0,03	0,47	0,33	0,37	0,30
Struct 4	moyenne 4	0,05	-	0,26	0,24	0,27	0,03
	écart-type 4	0,06	-	0,12	0,10	0,04	0,03
	min 4	0,00	-	0,07	0,07	0,20	0,00
	max 4	0,13	-	0,37	0,33	0,30	0,07
Significativité		*	*	*	*	*	*

Groupe		X.arbre 20.30m	X.arbre 2.9m	X.arbre 10.20m *	i. ordonnanceme nt	nb.arbre	sol nu
Struct 1	moyenne 1	-	0,94	0,06	0,96	20,33	0,54
	écart-type 1	-	0,06	0,06	0,06	4,04	0,34
	min 1	-	0,88	0,00	0,89	18,00	0,23
	max 1	-	1,00	0,12	1,00	25,00	0,90
Struct 2	moyenne 2	-	0,31	0,72	0,83	29,25	0,08
	écart-type 2	-	0,24	0,22	0,20	16,30	0,09
	min 2	-	0,04	0,43	0,56	16,00	0,00
	max 2	-	0,60	0,96	1,00	53,00	0,20
Struct 3	moyenne 3	0,30	0,61	0,17	0,30	41,00	0,12
	écart-type 3	0,02	0,10	0,15	0,03	26,87	0,07
	min 3	0,28	0,55	0,07	0,28	22,00	0,07
	max 3	0,32	0,68	0,27	0,32	60,00	0,17
Struct 4	moyenne 4	0,08	0,83	0,09	0,27	87,40	0,15
	écart-type 4	0,12	0,22	0,15	0,28	99,43	0,18
	min 4	0,00	0,53	0,00	0,00	24,00	0,00
	max 4	0,28	1,00	0,35	0,71	264,00	0,43
Significativité		*	*	*	*	NS	NS

Dans Struct 1, les arbres sont bien ordonnés et leur hauteur est comprise entre 2 et 9m. Il y a beaucoup de sol à nu.

Struct 2 a beaucoup de végétation annexe aux caféiers : fougères, mousses, lianes, un peu de ligneux et d'épiphytes. Il présente très peu de sol nu. Les arbres sont bien ordonnés, et leur hauteur est comprise majoritairement entre 10 et 20 m (arbres plantés en libre croissance), et minoritairement entre 2 et 9 m.

Struct 3 comprend une forte abondance de mousses, de lianes, de ligneux et d'épiphytes, et une faible abondance de fougères. Concernant la structure arborée, Struct 3 a un maximum d'arbres hauts (20 à 30m), peu d'arbres médians (10-20m) et moyennement d'arbres bas (2 à 9m). L'indice d'ordonnement étant faible, ce sont surtout des arbres poussant spontanément.

Struct 4 présente beaucoup de mousses, lianes et ligneux. Surtout, il a un maximum d'arbres, dont la hauteur est comprise entre 2 et 9m, et un peu entre 10 et 20m. Ce sont des arbres poussant spontanément.

### 3.1.5. Diversité spécifique $\alpha$ du peuplement arboré

Le tableau 13 décrit les groupes de diversité spécifique  $\alpha$ .

**Tableau 13 Description des groupes de diversité spécifique  $\alpha$**

nb.esp.spontane=nombre d'espèces d'arbres poussant spontanément, nb.esp.plante=nombre d'espèces d'arbres plantés, shannon=indice de Shannon, regularite=indice de régularité, \*=variable significative ( $p<0.05$ ), \*\*= $p<0.01$ .

Groupe		nb.esp.spontane	nb.esp.plante	shannon	regularite
Diva 1	moyenne 1	6,00	0,80	1,36	0,73
	écart-type 1	2,74	0,45	0,40	0,11
	min 1	3,00	0,00	0,98	0,61
	max 1	10,00	1,00	1,93	0,84
Diva 2	moyenne 2	1,17	2,17	0,84	0,80
	écart-type 2	1,60	0,41	0,34	0,08
	min 2	0,00	2,00	0,59	0,69
	max 2	4,00	3,00	1,44	0,90
Diva 3	moyenne 3	2,67	1,67	0,38	0,28
	écart-type 3	2,08	0,58	0,09	0,10
	min 3	1,00	1,00	0,30	0,17
	max 3	5,00	2,00	0,47	0,34
Significativité		*	**	*	*

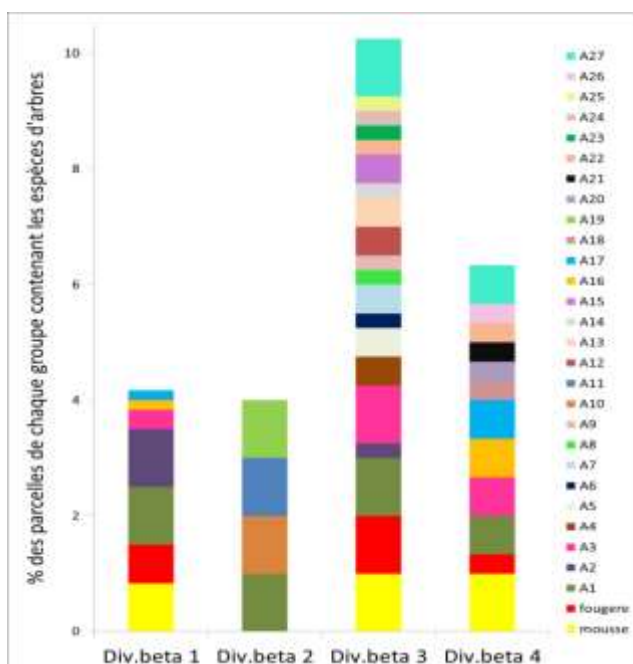
Divα1 comprend un maximum d'espèces spontanées, et un indice de Shannon maximal.

Divα2 a plus d'espèces plantées que de spontanées, mais un indice de Shannon intermédiaire (donc ce sont plutôt des espèces rares). Son indice de régularité est maximal, donc la proportion de chaque espèce de ce groupe est homogène.

Divα3 a un nombre d'espèces intermédiaire mais un indice de Shannon minimal (espèces non rares) de même qu'un indice de régularité minimal (inégalité de répartition des espèces).

### 3.1.6. Diversité spécifique β du peuplement arboré

Un tableau de présence ou absence d'espèces par parcelle est créé. L'indice de Sorensen est calculé à partir de ce tableau, en comparant les parcelles deux à deux (matrice de distance). La figure 8 représente le pourcentage de parcelles de chaque groupe contenant chaque espèce d'arbre identifiée.



En légende de la Figure 8, il y a le code des espèces arborées. En abscisse se trouvent les groupes de diversité β, et en ordonnées, le pourcentage de parcelles de chaque groupe comportant chaque espèce.

Divβ1 présente un faible nombre d'espèces, et surtout des espèces communes (a priori plantées).

Divβ2 présente un faible nombre d'espèces, mais ce sont plutôt des espèces uniques.

Divβ3 a un grand nombre d'espèces, certaines communes mais la plupart différentes.

Divβ4 présente un nombre d'espèces intermédiaire, avec des espèces communes et uniques.

Figure 8 Espèces présentes dans les groupes de diversité spécifique bêta

### 3.1.7. Profils d'incidence des bioagresseurs sur les caféiers

Les profils d'incidence de bioagresseurs sont définis par une combinaison de niveaux d'incidence dus à une série de bioagresseurs durant un cycle de culture (Savary et al., 2006). Le tableau 14 décrit les profils d'incidence des bioagresseurs des caféiers.

**Tableau 14 Description des profils d'incidence des bioagresseurs sur les caféiers**

mycena.citricolor=incidence de la maladie de la tâche américaine, hemileia.vastatrix=incidence de la rouille, pantomonus.spp=incidence du charançon, leucoptera.coffeella=incidence de la mineuse, cercospora.coffeicola=incidence de la cercosporiose, colletotrichum.coffeanum=incidence de l'antracnose, hypothemus.hampei=incidence du scolyte, dieback=incidence du dieback, \*=variable significative ( $p < 0.05$ ), NS=non significatif.

Groupe		mycena. citricolor	hemileia. vastatrix	pantomonus. spp	leucoptera. coffeella	cercospora. coffeicola	colletotrichum. coffeanum	hypothenam. hampei	dieback
BA.cafe 1	moyenne 1	0,66	-	0,51	1,46	20,04	7,51	4,47	0,03
	écart-type 1	0,21	-	0,44	0,77	12,02	6,42	4,23	0,03
	min 1	0,41	-	0,00	0,61	12,86	1,02	0,00	0,00
	max 1	0,78	-	0,78	2,11	33,92	13,85	8,40	0,07
BA.cafe 2	moyenne 2	0,20	40,02	95,00	-	7,34	10,56	-	0,16
	écart-type 2	0,07	1,41	3,93	-	6,05	4,86	-	0,21
	min 2	0,15	39,02	92,22	-	3,06	7,13	-	0,01
	max 2	0,25	41,02	97,78	-	11,62	14,00	-	0,31
BA.cafe 3	moyenne 3	0,39	58,61	-	0,65	10,22	2,88	0,15	0,21
	écart-type 3	0,17	25,99	-	0,58	6,32	2,23	0,30	0,14
	min 3	0,21	23,43	-	0,00	1,77	0,00	0,00	0,10
	max 3	0,61	82,66	-	1,30	17,07	5,40	0,60	0,41
BA.cafe 4	moyenne 4	0,12	57,63	26,82	1,77	8,73	3,34	2,76	0,05
	écart-type 4	0,07	6,54	38,43	1,24	4,62	2,80	3,88	0,05
	min 4	0,06	51,20	0,00	0,88	4,40	0,74	0,00	0,00
	max 4	0,25	65,86	83,08	3,91	15,69	7,36	9,40	0,11
Significativité		*	*	NS	NS	NS	NS	NS	NS

BA.cafe1 présente un profil de bioagresseurs avec un maximum d'incidence de tâche américaine, de scolyte, de cercosporiose, beaucoup de mineuse et d'anthracnose, et peu de dieback.

BA.cafe2 a un maximum d'incidence d'anthracnose et de charançon, beaucoup de rouille et de dieback, et un peu de tâche américaine.

BA.cafe3 présente un maximum d'incidence de rouille et de dieback, beaucoup de tâche américaine, un peu d'anthracnose, de mineuse et de cercosporiose.

BA.cafe4 a un maximum d'incidence de mineuse, beaucoup de rouille, et peu de dieback, de charançon, d'anthracnose, de cercosporiose et de scolyte.

### 3.1.8. Profils d'incidence des bioagresseurs sur les témoins

Le tableau 15 décrit les profils d'incidence des bioagresseurs des témoins.

**Tableau 15 Description des groupes de profil d'incidence des bioagresseurs sur les plants témoins**  
mycena.citricolor=incidence de la maladie de la tâche américaine, pantomonus.spp=incidence du charançon, hemileia.vastatrix=incidence de la rouille, leucoptera.coffeella=incidence de la mineuse, cercospora.coffeicola=incidence de la cercosporiose, colletotrichum.coffeanum=incidence de l'anthracnose \*=variable significative (p<0.05), \*\*\*=p<0.001, NS=non significatif.

Groupe		mycena. citricolor	pantomonus. spp	hemileia. vastatrix	leucoptera. coffeella	cercospora. coffeicola	colletotrichum. coffeanum
BA.témoin 1	moyenne 1	0,00	-	13,69	0,68	18,58	2,53
	écart-type 1	0,00	-	7,81	0,07	2,33	0,17
	min 1	0,00	-	8,17	0,63	16,93	2,41
	max 1	0,00	-	19,22	0,73	20,22	2,65
BA.témoin 2	moyenne 2	27,42	-	46,11	-	6,44	9,96
	écart-type 2	7,15	-	31,95	-	1,09	2,07
	min 2	22,37	-	23,52	-	5,67	8,49
	max 2	32,47	-	68,70	-	7,21	11,42
BA.témoin 3	moyenne 3	1,84	-	73,42	0,10	8,96	4,82
	écart-type 3	4,12	-	17,35	0,22	2,54	2,08
	min 3	0,00	-	53,92	0,00	4,99	2,15
	max 3	9,22	-	90,50	0,49	11,85	7,43
BA.témoin 4	moyenne 4	1,24	15,62	47,33	0,56	7,11	4,09
	écart-type 4	0,92	8,26	21,59	0,53	2,65	5,55
	min 4	0,64	5,05	21,37	0,00	3,55	0,76
	max 4	2,62	22,38	71,81	1,17	9,32	12,38
Significativité		*	***	NS	NS	NS	NS

BA.temoin1 présente un maximum d'incidence de cercosporiose et de mineuse.

BA.temoin2 a un maximum d'incidence de tâche américaine, beaucoup de rouille et un peu de cercosporiose.

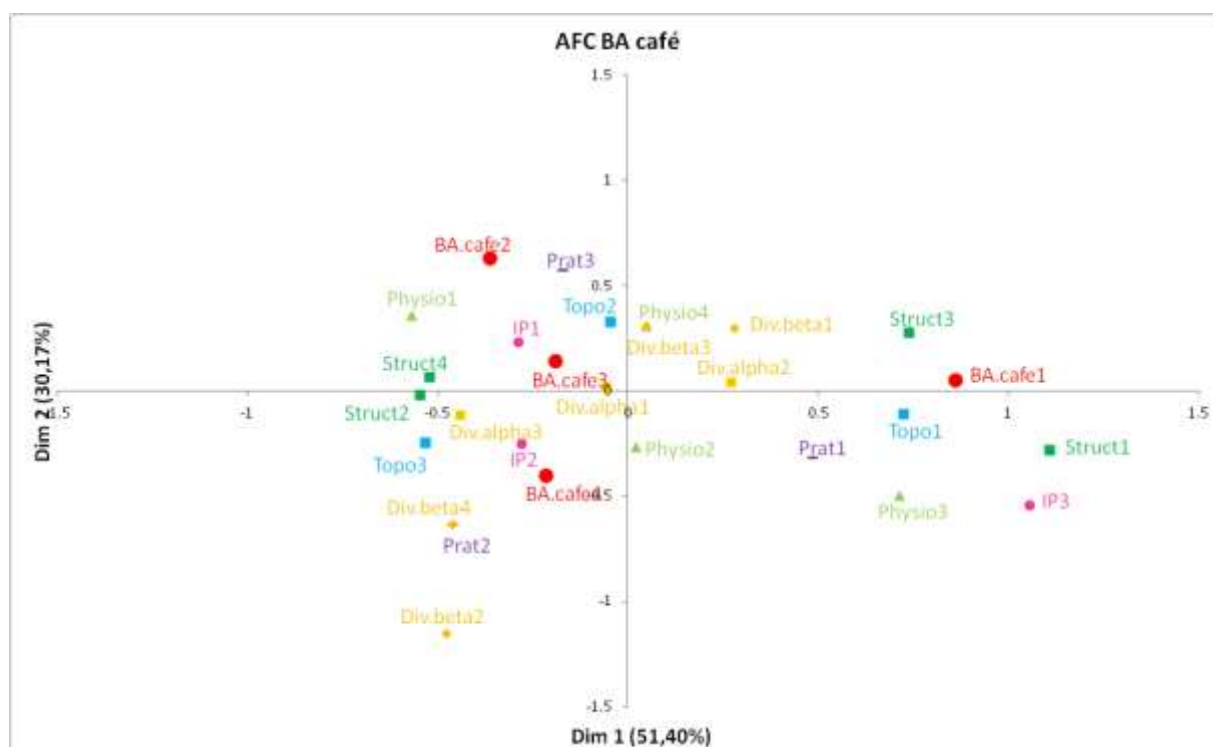
BA.temoin3 possède un maximum d'incidence de rouille, et un peu d'anthracnose et de cercosporiose.

BA.temoin4 a un maximum d'incidence de charançon, beaucoup de mineuse et de rouille et un peu de cercosporiose et d'anthracnose.

## 3.2. Analyses Factorielles de Correspondances (AFC)

### 3.2.1. AFC pour les profils d'incidence des bioagresseurs sur les caféiers

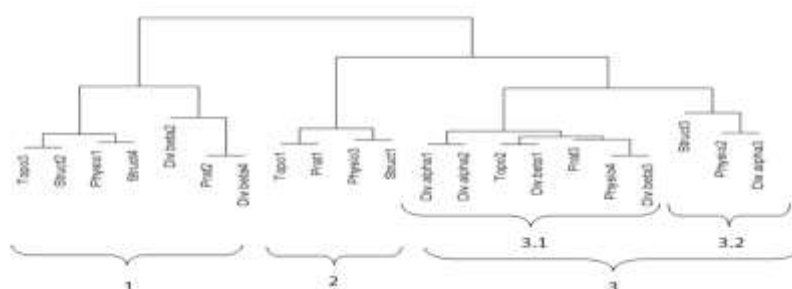
Après avoir réalisé le tableau de contingence entre les groupes de bioagresseurs des caféiers et les groupes des typologies de topoclimat, caractéristiques physiques et physiologiques des caféiers, pratiques culturales, structure du peuplement, diversités spécifiques  $\alpha$  et  $\beta$ , une AFC entre ces groupes est faite afin de mettre en évidence les relations entre les groupes de situation de production et les profils de bioagresseurs des caféiers. L'indice de production est ajouté en variable supplémentaire illustrative. Les coordonnées des groupes sur les dimensions 1 et 2 ont permis de représenter l'AFC en Figure 9.



**Figure 9 Représentation de l'AFC entre les profils de bioagresseurs des caféiers et les situations de production**

La troisième dimension est de 18.43% d'inertie.

Nous cherchons les associations significatives entre les groupes en réalisant une typologie sur l'AFC (Fig.10).



**Figure 10 Dendrogramme associé à l'AFC sur le profil de bioagresseurs des caféiers**

Trois associations sont dégagées.

Un test de Mantel entre les matrices de distances des différentes catégories de variables est réalisé afin de tester les corrélations linéaires entre ces matrices, et ainsi voir si certaines catégories de variables sont liées. Si la p-value est inférieure à 0.05 entre deux catégories de variables, alors nous pouvons dire que plus des parcelles sont distantes du point de vue d'une catégorie, plus elles le sont du point de vue de l'autre catégorie (Tab.16).

**Tableau 16 Résultats du test de Mantel (BA.cafe)**

Niveaux de significativité

\*\*\*: p-value<0.001

\*\*: p-value<0.01

\*: p-value<0.05

p-value	Topo	Physio	Prat	Struct	Diva	Divβ	BA.cafe
<b>Topo</b>							
<b>Physio</b>	0.1047						
<b>Prat</b>	0.0557	0.0799					
<b>Struct</b>	0.3596	0.0004***	0.0009***				
<b>Diva</b>	0.7380	0.4897	0.1190	0.0144*			
<b>Divβ</b>	0.2471	0.0357*	0.3767	0.09	0.0029**		
<b>BA.cafe</b>	0.3205	0.4960	0.1953	0.7659	0.4382	0.2439	

#### *Association 1(7 groupes)*

Le profil d'incidence des bioagresseurs de ce groupe est caractérisé surtout par une incidence maximale de charançon et d'anthracnose, une forte incidence de rouille et de dieback et une faible incidence de maladie de la tâche américaine.

Associées à ce profil de bioagresseurs, se trouvent des situations de production de parcelles abandonnées depuis peu, dans lesquelles se trouve beaucoup de végétation annexe de milieux ouverts aux caféiers : un maximum de fougères au sol, mais aussi beaucoup de lianes, de mousses et de petits plants de caféiers. Il peut y avoir beaucoup d'arbres par ailleurs, d'espèces plantées ainsi que de quelques espèces spontanées, mais la couverture arborée est intermédiaire. Cette végétation annexe aux caféiers explique que la température et l'humidité relative soient tamponnées (amplitudes de température et d'humidité relative faibles). Par ailleurs, le sol est riche en éléments minéraux.

#### *Association 2 (4 groupes)*

Le profil d'incidence de bioagresseurs est caractérisé par une incidence maximale du scolyte, et de maladie de la tâche américaine, une forte incidence de mineuse, de cercosporiose et d'anthracnose et pas de rouille.

Cette association est caractérisée par une forte production et des caféiers vigoureux. En effet, les parcelles sont en usage et il y a des apports de fertilisation, de taille et de désherbage. Au niveau de la structure, il y a beaucoup de sol nu et les arbres sont bien ordonnés, car se sont des arbres plantés en ligne (pour l'apport en azote des légumineuses comme l'érythrine). Ces arbres sont taillés (Prat 1), aussi les amplitudes de température et d'humidité relative sont grandes, et la température moyenne aussi.

#### *Association 3(10 groupes) :*

Cette association inclut la majorité des groupes et est composée de deux sous-associations : 3.1 et 3.2.

*Association 3.1 (7 groupes) :* Le profil d'incidence de bioagresseurs de cette association est défini par une forte incidence de dieback, de tâche américaine et de rouille et par la présence de cercosporiose, de mineuse et d'anthracnose. La production est quasi-nulle, et les parcelles sont abandonnées depuis très longtemps. C'est une association où la diversité est assez voire très élevée



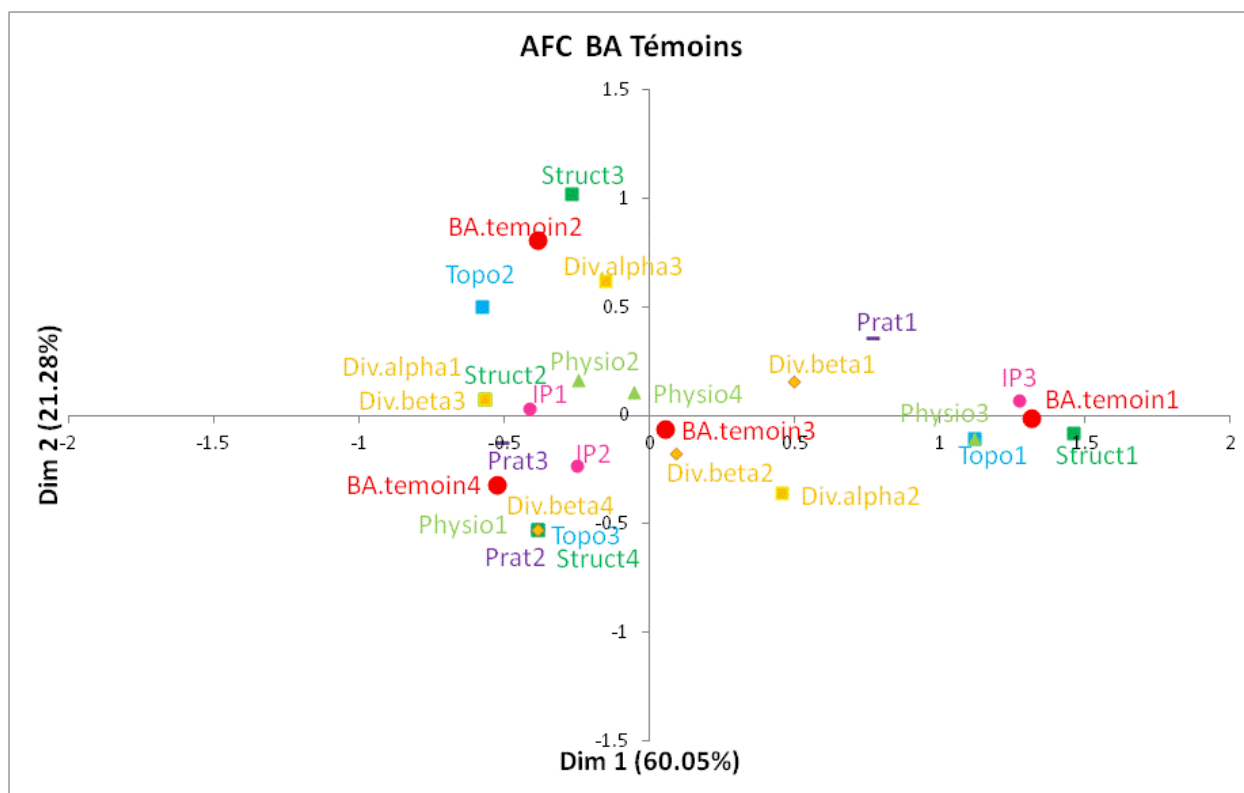
(abandon depuis très longtemps) et où la couverture arborée est très forte, avec des arbres très hauts. Le sol est pauvre en éléments minéraux.

**Association 3.2 (3 groupes):** Cette association est caractérisée par une forte incidence de rouille et de mineuse, et par la présence de scolyte, de cercosporiose et d'anthracnose. Les parcelles de cette association ont une production faible. En effet les caféiers ne produisent que très peu de nœuds fructifères et de tiges orthotropes, même si leur vigueur est assez élevée. Au niveau de la diversité spécifique, il y a peu d'espèces rares, et elles sont peu régulièrement réparties. La végétation est caractéristique des milieux ouverts (lianes).

L'étude des bioagresseurs des caféiers introduit un biais dû à la présence de variétés différentes, et dont certaines sont résistantes à la rouille (et plus sensibles à d'autres bioagresseurs) et dû aux antécédents de la parcelle. Des témoins vierges de tout historique ont donc été plantés dans les parcelles, et les profils d'incidence de bioagresseurs ont été étudiés de même que pour les caféiers. Il faut noter le biais dû à l'absence de production (jeunes caféiers), et donc à l'absence de scolyte.

### 3.2.2. AFC pour les profils d'incidence des bioagresseurs sur les plants témoins

La même méthode que pour les caféiers est utilisée. On obtient la représentation de l'AFC sur la Figure 11 via les coordonnées des groupes sur les deux premières dimensions.



**Figure 11 Représentation de l'AFC sur le profil d'incidence de bioagresseurs sur les plants témoins**

La troisième dimension est de 18.67% d'inertie. Trois associations significatives sont dégagées en réalisant une typologie sur les axes de l'AFC (Fig.12).

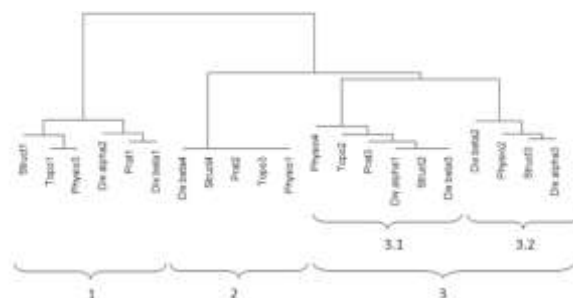


Figure 12 Dendrogramme associé à l'AFC sur les bioagresseurs des plants témoins

Un test de Mantel entre les matrices de distances des différentes catégories de variables est réalisé afin de voir si certains groupes sont liés (Tab.17).

Tableau 17 Résultats du test de Mantel (BA témoins)

Niveaux de significativité

\*\*\*: p-value<0.001

\*\*: p-value<0.01

\*: p-value<0.05

p-value	Topo	Physio	Prat	Struct	Divα	Divβ	BA.temoin
Topo							
Physio	0.1047						
Prat	0.0557	0.0799					
Struct	0.3596	0.0004***	0.0009***				
Divα	0.7380	0.4897	0.1190	0.0144*			
Divβ	0.2471	0.0357*	0.3767	0.09	0.0029**		
BA.temoin	0.2696	0.4919	0.0057	0.0289*	0.4383	0.7661	

Association 1(6 groupes) :

Cette association est similaire à l'association 2 de l'AFC sur les profils d'incidence de bioagresseurs sur les caféiers, avec en plus peu de diversité spécifique. Cependant, le profil d'incidence de bioagresseurs est différent au niveau de l'absence de tâches américaines et la présence de rouille.

Association 2 (5 groupes) :

Ce groupe est similaire au groupe 1 de l'AFC sur les profils d'incidence des bioagresseurs sur les caféiers (sans l'importance des fougères, mais avec un nombre important d'arbres). Concernant le profil de bioagresseurs, il y a aussi beaucoup de charançon et de rouille, et un peu moins d'anthracnose. La différence principale est la présence de mineuse.

Association 3 (10 groupes) :

Association 3.1 (6 groupes) : Cette association est équivalente à l'association 3.1 de l'AFC précédente, avec en plus une structure peu ordonnée, beaucoup d'arbres et de végétation annexe aux caféiers. Le profil de bioagresseurs est similaire pour la rouille, l'anthracnose et la cercosporiose. Il diffère surtout par l'absence de mineuse.

Association 3.2 (4 groupes): Cette association est similaire à la 3.2 de l'AFC précédente, avec une forte diversité spécifique. Le profil de bioagresseurs est similaire à propos de la rouille, de la tâche américaine et de la cercosporiose. La différence est qu'il n'y a pas d'anthracnose alors que pour les caféiers il y en a un peu.

## 4. Discussion

### 4.1. Résultats

#### 4.1.1. AFC pour les profils d'incidence des bioagresseurs sur les caféiers

Les chiffres entre parenthèses représentent la flèche d'interaction correspondante sur le modèle conceptuel lié à chaque association.

*Association 1 (liée à la Figure 13) :*

La maladie de la tâche américaine étant favorisée par l'ombre, sa faible incidence peut être due à ce que la couverture arborée ne soit qu'intermédiaire (1), de même pour la forte incidence d'anthracnose (2), favorisée par l'absence d'ombrage.

Normalement, la rouille est favorisée dans les caféières productives (Avelino, 2013). Ici, la production est assez faible. Cependant, les caféiers sont bien vigoureux et le sol est riche en sels minéraux, donc cela peut expliquer la forte incidence de rouille (3). Cette vigueur, malgré un cortège de bioagresseurs diversifié pourrait être liée à la richesse en éléments minéraux du sol (4). Une autre hypothèse serait due à ce que le cycle du caféier est biennuel. L'année dernière les caféiers auraient pu produire beaucoup, d'où une forte incidence de rouille, et de plus 2012-2013 a été une année avec une épidémie de rouille sans précédent dans toute l'Amérique centrale, ce qui aurait laissé un inoculum important pour cette année (5).

Enfin, la présence du charançon, qui n'est pas un ravageur classique du caféier, peut peut-être s'expliquer par la présence de plantes hôtes (6). En effet, dans la station expérimentale du Centre agronomique tropical de recherche et d'enseignement de Turrialba, il y a aussi la présence de ce charançon, et après entretien avec un travailleur, il semblerait que ce ravageur soit attiré par certains arbustes, notamment *Ricinus communis*. Cet arbuste est planté en même temps que l'erythrine car il grandit très vite, donc permet de faire une ombre temporaire aux caféiers. Donc un moyen de contrôle du charançon serait de choisir des espèces non hôtes.

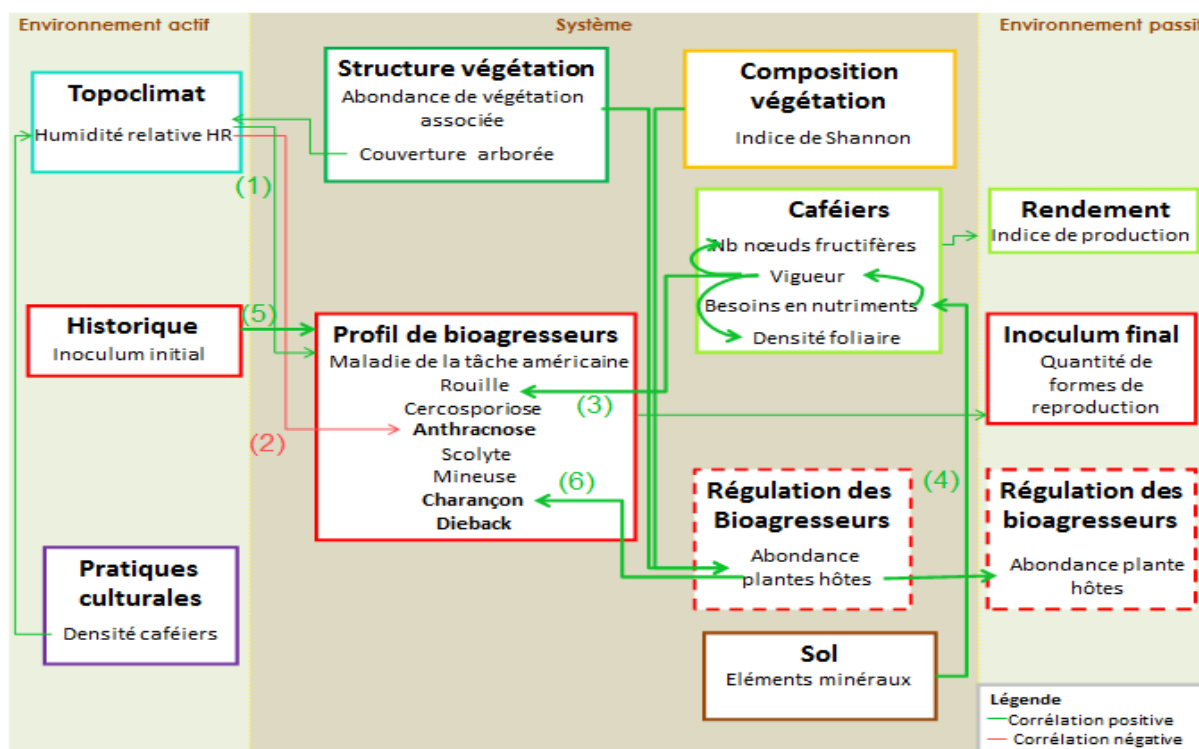
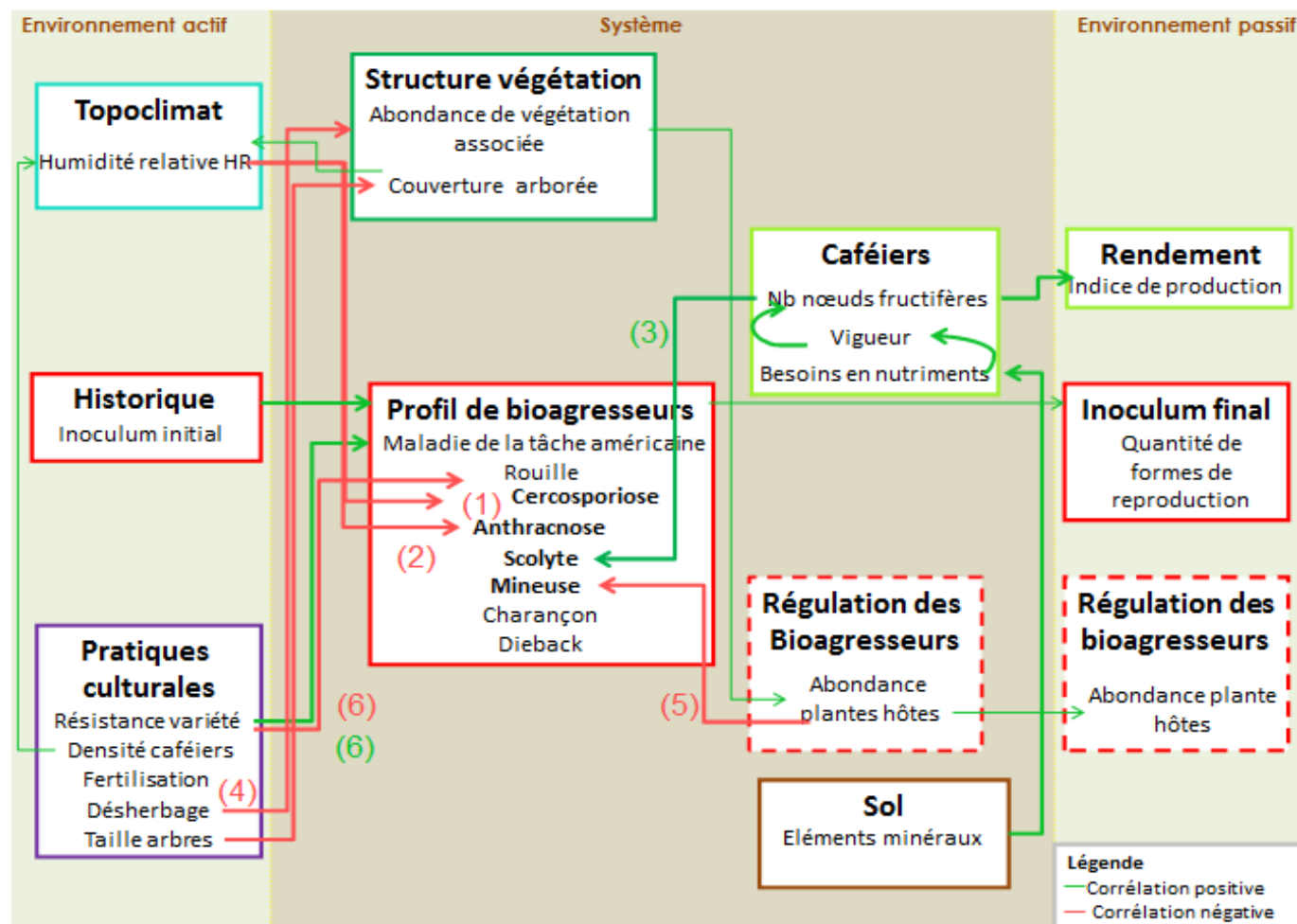


Figure 13 Modèle conceptuel représentant les interactions de l'association 1

*Association 2 (liée à la Figure 14) :*

Le fait que les arbres soient taillés expliquerait l'incidence maximale de la cercosporiose (1), et la forte incidence d'anthracnose (2) favorisées par le soleil. L'incidence maximale du scolyte pourrait être liée à la présence de nombreuses baies de café (3). De plus il n'y a quasiment aucune végétation annexe aux caféiers, car il y a des applications d'herbicides ou du désherbage manuel entre les rangs (4). Aussi la mineuse n'aurait pas de plantes hôtes au sol (Avelino, 2013), ce qui expliquerait sa forte incidence sur les caféiers (5). Ceci souligne l'importance de couverture au sol. Il y a une forte incidence de maladie de la tâche américaine, et pas de rouille. Cela peut être en partie expliqué par la présence de la variété Catimor, résistante à la rouille et plus sensible à la tâche américaine (6).



**Figure 14** Modèle conceptuel représentant les interactions de l'association 2

*Association 3.1 (liée à la Figure 15) :*

La pauvreté du sol en éléments minéraux pourrait expliquer le peu de vigueur des caféiers (1) et la production nulle, ainsi que la présence de cercosporiose (2) et anthracnose (3) (champignons opportunistes). La forte incidence de la tâche américaine serait liée à l'humidité relative élevée apportée par la forte couverture arborée, et de même pour la rouille (4) (aussi influencée par la forte incidence l'an dernier) (5). Le profil de bioagresseurs des caféières abandonnées depuis longtemps est ainsi bien diversifié.

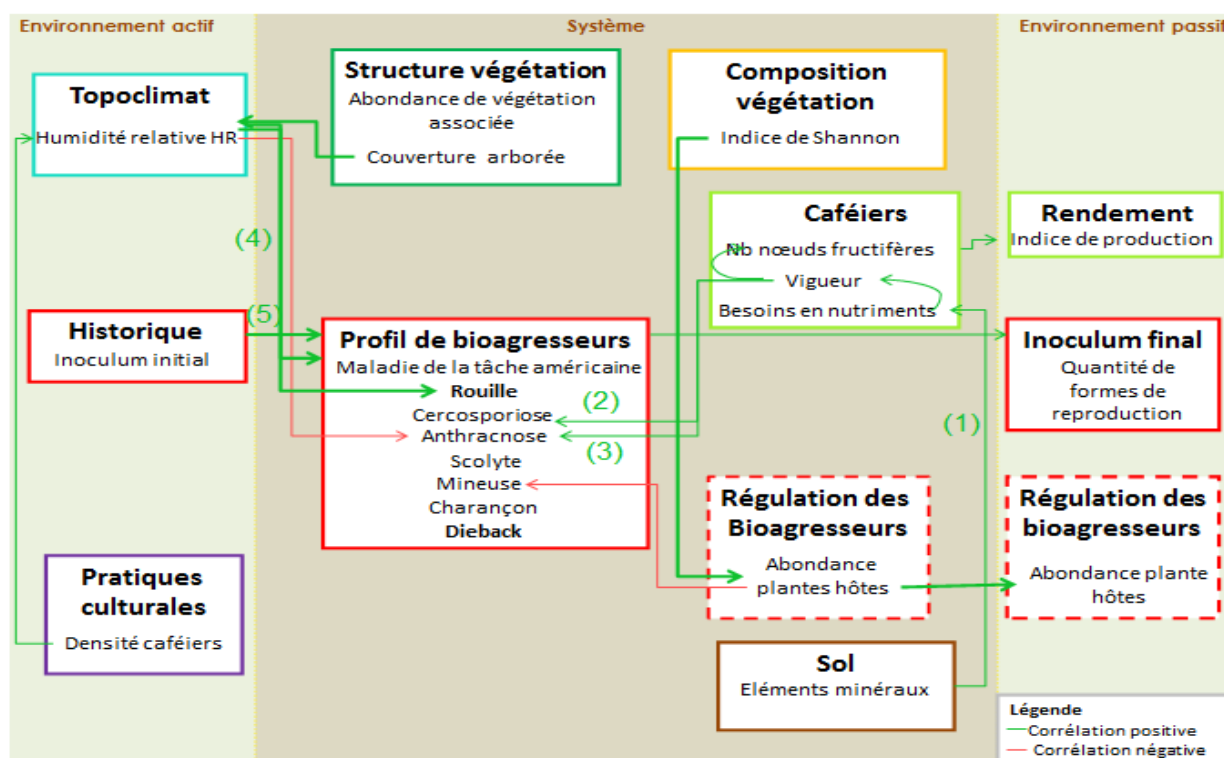


Figure 15 Modèle conceptuel représentant les interactions de l'association 3.1

Association 3.2 (liée à la Figure 16) :

La présence de scolyte serait liée au fait qu'il y ait une production de baies de café (1). Par ailleurs, il y a une forte incidence de rouille, associée à un grand nombre d'arbres hauts (2) et de mineuse, peut-être associée à une faible diversité de la végétation annexe (3).

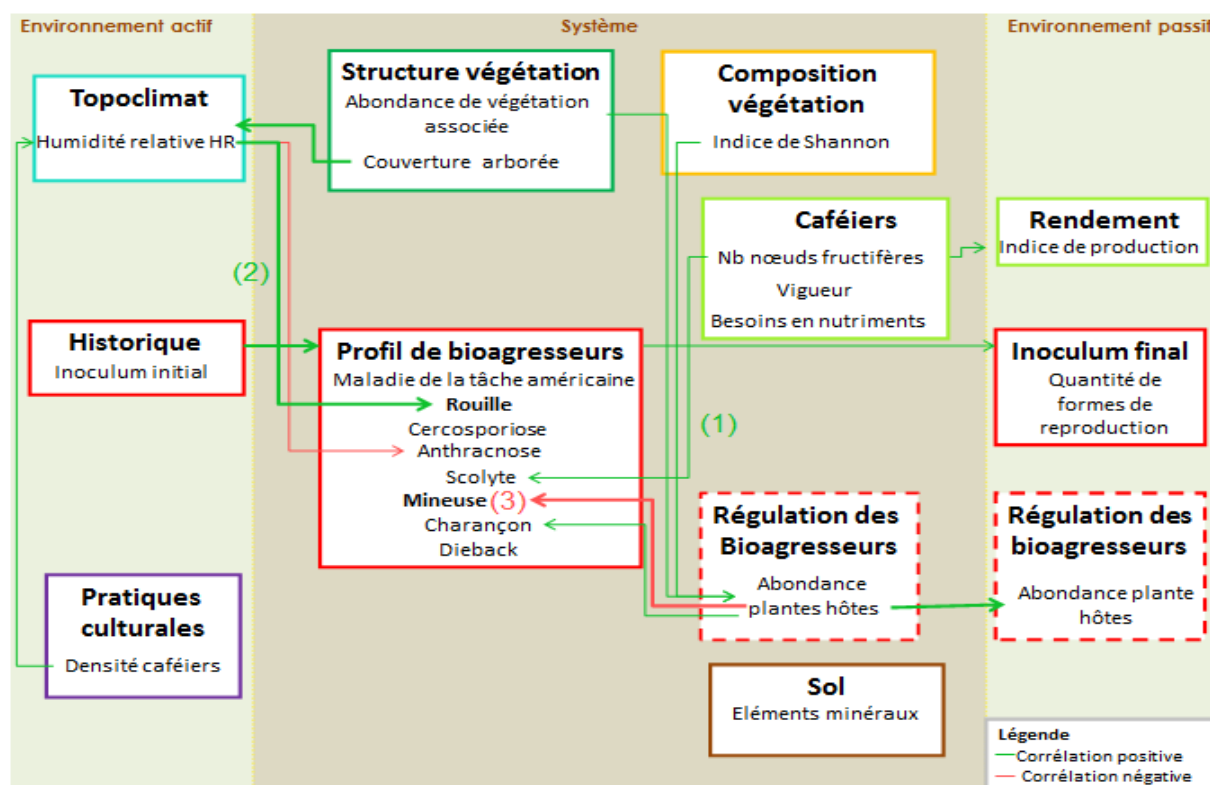


Figure 16 Modèle conceptuel représentant les interactions de l'association 3.2

#### 4.1.2. AFC pour les profils d'incidence des bioagresseurs sur les plants témoins

Les associations entre les deux AFC sont semblables. Cependant, dans l'association 2 de l'AFC sur les bioagresseurs des caféiers, il n'y avait pas d'incidence de rouille et une incidence maximale de tâche américaine, alors que dans l'association 1 des bioagresseurs des témoins, il y a présence de rouille et absence de tâche américaine. Cela souligne l'importance de l'effet variété : la variété Catimor de la première association est ainsi résistante à la rouille mais plus sensible à la maladie de la tâche américaine.

Nous pouvons conclure qu'il existe des profils d'incidence de bioagresseurs différents et caractéristiques des diverses situations de production (Fig.17). Cependant, on ne sait quel profil occasionne plus de dégâts et donc de pertes de rendement.

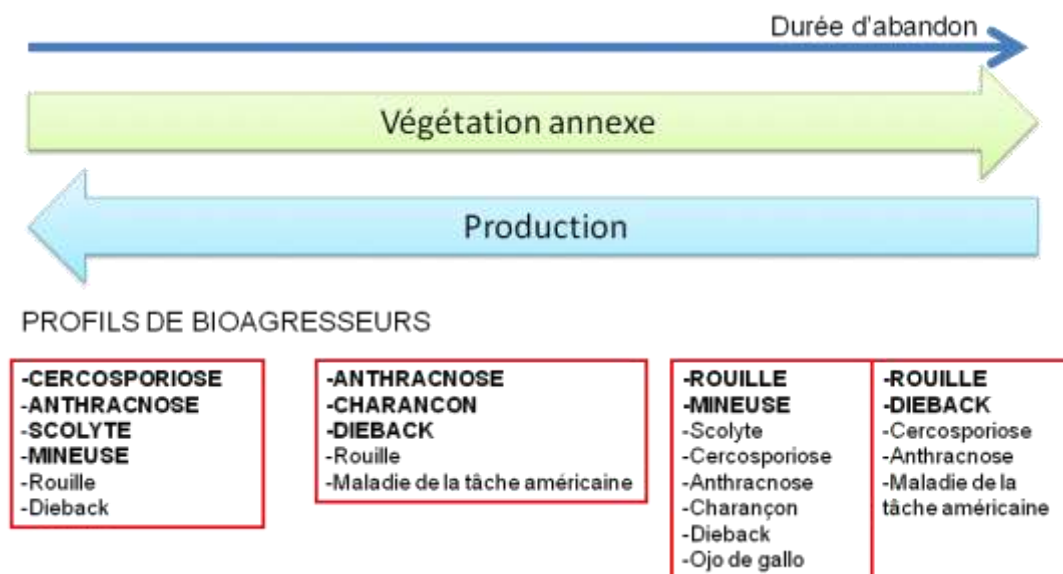


Figure 17 Profils d'incidence de bioagresseurs rencontrés en fonction de la durée d'abandon

Il n'y a pas forcément moins d'incidence de bioagresseurs dans les caféières abandonnées comme on le pensait a priori (équilibre des bioagresseurs, ...). Il y a même l'apparition de charançons, qui ne sont pas présents dans les parcelles en usage.

L'abandon est lié positivement à l'augmentation de végétation associée aux caféiers. En augmentant cette végétation et donc la diversité présente sur la parcelle, apparaissent des bioagresseurs, tels que le charançon, qui ne sont pas forcément spécialisés dans le café, mais qui sont plutôt généralistes et attaquent le caféier car ils sont présents dans la parcelle, attirés par diverses plantes hôtes. A l'inverse, la végétation annexe de la parcelle pourrait aussi réguler les bioagresseurs en les détournant du caféier, comme dans le cas de la mineuse. Par ailleurs, la diversité des bordures de parcelles peut permettre l'entretien d'auxiliaires de cultures. Par exemple, le fait d'avoir du scolyte dans les caféières attire les oiseaux insectivores venant des parcelles de forêt environnantes (Watson, 2013).

En tout cas, une régulation des bioagresseurs s'exercerait dans les caféières en usage comme dans les abandonnées, liée au fait qu'il y ait de la diversité dans ou proche de la parcelle.

## 4.2. Méthodologie

### 4.2.1. Dispositif expérimental

L'échantillonnage de seulement 14 parcelles est assez réduit. Il serait intéressant de pouvoir rajouter d'autres situations comme des parcelles anciennement conventionnelles abandonnées depuis très longtemps, et pas seulement depuis 3 ans. De plus, notre gradient ne met pas non plus en



évidence une très grande diversité car il y a une vingtaine d'années, ces parcelles étaient encore intensives et en plein soleil. Peu d'arbres ont donc pu s'y implanter. Par exemple : l'indice de Shannon d'une forêt dense au Bénin, dont le climat est aussi tropical, est de 4.69 (Mouhamadou et al., 2012), alors que l'indice de Shannon le plus élevé des parcelles abandonnées est seulement de 1.64.

#### 4.2.2. Prise de mesures

##### *Topoclimat*

Il serait intéressant d'étudier la pluviométrie, et notamment la manière dont arrive la pluie dans la parcelle. En effet, selon la structure du peuplement, les gouttes peuvent être coalescentes ou être interceptées et donc influencer sur la dispersion des champignons (Beer et al., 1998). Il manque aussi pour les sols la teneur en matière organique, la densité apparente pour voir la compaction du sol plutôt que la texture (qui n'est pas possible à réaliser sur andosols du fait de leur structure de « gel » (Chevallier et al., 2008)) et réaliser un profil de sol.

##### *Structure du peuplement végétal*

Il aurait fallu relever le nombre d'arbres par sous-parcelles (par exemple de 10 x 10m) afin de pouvoir voir leur organisation spatiale horizontale grâce à leur dispersion (Cilas et al., 2009). Par contre, cela requiert beaucoup de temps. Nous avons utilisé à la place d'autres indicateurs tels que la dispersion de la couverture arborée à 1m (même si ne reflète pas exactement le nombre d'arbres mais plutôt leur couronne) et l'indice d'ordonnancement (nombre d'arbres plantés/nombre d'arbres total). Il serait aussi intéressant d'étudier la dynamique de la structure arborée dans le temps, car les arbres peuvent être taillés, tomber, et il y a des espèces dont les feuilles sont caduques et tombent au rythme des saisons.

##### *Diversité spécifique*

Pour des raisons de temps, nous nous sommes concentrés sur la flore uniquement, et surtout sur les arbres (pour le nombre d'espèces et leur identification). Une perspective serait d'élargir l'étude à tout le règne végétal, et aussi sur la faune. Surtout que les épiphytes, mousses, lichens, troncs morts sont des habitats pour beaucoup d'espèces de la canopée (Perfecto et al., 1996). Cela nous permettrait notamment d'identifier les interactions entre les auxiliaires et le cortège de bioagresseurs (surtout insectes et champignons). L'aspect de diversité fonctionnelle (mesure d'attributs de traits fonctionnels choisis, comme le fait d'être hôte de bioagresseurs ou non) serait aussi à explorer.

##### *Profils d'incidence de bioagresseurs*

Seulement le pourcentage de feuilles touchées par les bioagresseurs a été mesuré. Or dans les caféières abandonnées, il y a peu de feuilles (manque de lumière, compétition,...) et donc le niveau d'incidence peut être surestimé en le comparant avec les caféiers ayant une forte densité foliaire. Ainsi, dans les caféières en usage, le nombre important de feuilles engendre un effet dilution sur l'impact des bioagresseurs. Une solution serait l'utilisation d'une échelle de surface touchée (Vonthron, 2012) mais cela est très long à mettre en œuvre. Le profil d'incidence des bioagresseurs pourrait être aussi élargi aux bioagresseurs telluriques.

Nous avons utilisé des plants témoins sensibles et sans antécédents pour s'affranchir de l'effet de la résistance de la variété. Cependant, ces plants sont trop jeunes pour produire, donc ne donnent pas accès à l'incidence du scolyte. Il faudrait suivre leur évolution lorsqu'ils seront productifs (3 à 4 ans (Charvet, 2013)). Par ailleurs, le fait de les planter dans des parcelles de caféiers résistants à la rouille peut fausser les résultats : en effet il n'y a pas de multiplication de la rouille sur les caféiers résistants, donc peut-être qu'il y a moins de concentration de spores dans l'air et moins de dispersion, donc moins d'incidence sur les plants témoins. Idéalement, il faudrait comparer des parcelles ayant

les mêmes variétés et aussi étudier l'effet du mélange variétal comme moyen de contrôle (car il réduit l'inoculum initial). De plus, nous pourrions mesurer l'inoculum initial pour voir l'effet de l'année précédente.

#### 4.2.3. Analyses statistiques

L'effectif de 14 parcelles est limitant pour la puissance des analyses statistiques. Nous n'avons effectué que des tests non paramétriques. Mais le test du  $\chi^2$  de dépendance est limité avec un si petit effectif. Nous avons pensé au modèle linéaire généralisé, mais finalement le test du  $\chi^2$  nous a paru être la meilleure solution en sachant ses limites.

Par ailleurs, nous n'avons pas beaucoup de corrélations linéaires entre l'incidence des bioagresseurs et les variables, deux à deux. C'est donc un ensemble de variables qui jouent sur l'incidence d'un bioagresseur et non une seule variable. D'où l'avantage d'une analyse multivariée, plus globale qui prend en compte les corrélations multiples.

## 5. Conclusion

Le modèle conceptuel permet de nous donner une vision d'ensemble sur les interactions multiples et contradictoires entre l'incidence des bioagresseurs et le reste de l'agroécosystème. Il existe bien des relations entre les situations de production et les profils d'incidence de bioagresseurs illustrées par ce modèle. Il serait intéressant d'approfondir les hypothèses formulées sur les interactions entre les ravageurs et leurs mécanismes de régulation (charançon, mineuse, scolyte avec les plantes hôtes et auxiliaires de culture). Ce modèle nous indique quelques leviers d'action importants, tels que :

- l'historique de la parcelle : permet d'anticiper une forte incidence de bioagresseurs lorsqu'on sait que l'inoculum final de l'année précédente est fort,
- le sol : sa richesse et sa structure influent sur la physiologie du caféier et sa capacité de résistance ou de dilution des incidences de bioagresseurs,
- la couverture arborée: trouver l'optimum permettant la plus faible incidence possible des divers bioagresseurs réagissant différemment à sa proportion. Cela implique d'intervenir dans le mode de taille des arbres, le choix de leurs espèces donc de leur phénologie (avoir des chutes de feuilles décalées pour avoir une couverture homogène dans le temps), et leur organisation spatiale (homogénéité dans l'espace).
- la résistance ou non des variétés de caféiers : à choisir selon l'incidence des différents bioagresseurs dans la parcelle.
- la composition de la végétation associée aux caféiers : choisir les espèces au niveau des traits fonctionnels, qui sont les caractéristiques d'un organisme considérées pertinentes pour sa réponse à l'environnement et/ou ses effets sur l'écosystème fonctionnant (Díaz and Cabido, 2001) (hôte ou non par exemple) souhaités. Cela implique de réviser le mode de gestion des herbicides, qui bien que permettant un moindre temps de travail et une facilité de passage, suppriment la végétation inter-rang pouvant être hôte et diminuer l'incidence de la mineuse (en plus de l'incidence que l'on connaît sur l'environnement et la santé).

Ainsi, le système de culture doit être pensé dans son ensemble car chaque modification aura des conséquences pas forcément toutes positives sur ses composants. D'où l'intérêt d'une vision systémique apportée par le modèle.

Pour répondre aux hypothèses :

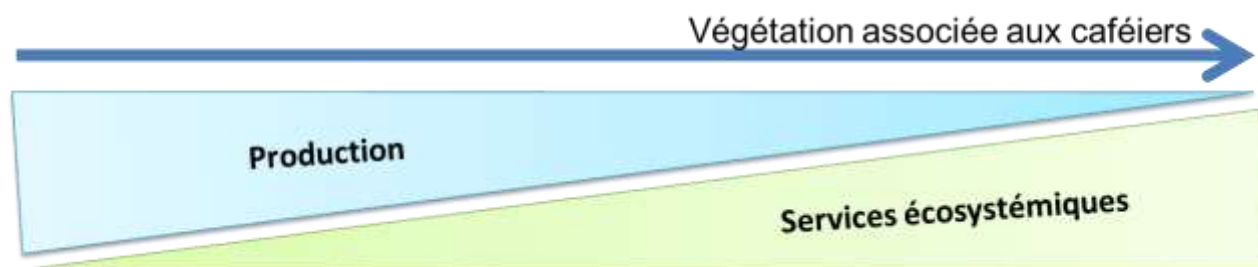
H1 : Il existe des profils d'incidence de bioagresseurs différents selon les situations de production, qui incluent la diversité biologique. Il semble que la diversité dans et proche des parcelles influe sur la dynamique des ravageurs, en abritant les auxiliaires de culture ou en détournant les bioagresseurs des caféiers. Elle peut aussi avoir un effet antagoniste lorsqu'elle attire d'autres bioagresseurs.

H2 : Nous avons pu supposer la présence de régulation des bioagresseurs dans le cas de parcelles avec une présence de végétation associée aux caféiers (pour les ravageurs). Cependant, peut-être que notre réseau ne contenait pas assez de diversité pour pouvoir mettre mieux en évidence ces mécanismes de régulation. Aussi, il serait intéressant d'élargir ce réseau à d'autres parcelles cultivées sans pesticides, converties au biologique depuis beaucoup plus longtemps, et qui auraient une richesse spécifique bien plus importante. L'association des producteurs biologiques de Turrialba serait alors une piste.

Par ailleurs, notre réseau présente un intérêt particulier par la présence de caféières abandonnées. En effet, il serait intéressant d'y étudier la capacité de récupération des caféières abandonnées en fonction de leur ancienne gestion (conventionnelle ou biologique) et ainsi étudier la résilience des

caféières et l'impact de l'ombrage sur cette résilience, dans le contexte actuel de changement climatique.

De plus, nous pourrions aller plus loin que la caractérisation des profils d'incidence de bioagresseurs en fonction des situations de production. L'intérêt serait alors de quantifier les dégâts réalisés par ces combinaisons de bioagresseurs et les pertes de rendement qui leur sont associées.



**Figure 18** Représentation de la perte de production et de l'augmentation en services écosystémiques en fonction du gradient de végétation annexe

La figure 18 représente le dilemme entre la perte de production de café avec l'augmentation de l'abondance et de la diversité de la végétation associée aux caféiers, et la perte de services écosystémiques apportés. L'enjeu est alors de pouvoir identifier un compromis entre pertes de rendement et pertes de services écosystémiques (ressources en eau, fertilité du sol, séquestration de carbone, diversité biologique,...) apportées par le système agroforestier caféier.

## Références bibliographiques

Avelino, J. (2013). Diffusion personnelle.

Avelino, J., Zelaya, H., Merlo, A., Pineda, A., Ordoñez, M., and Savary, S. (2006). The intensity of a coffee rust epidemic is dependent on production situations. *Ecol. Model.* 197, 431–447.

Avelino, J., Cabut, S., Barboza, B., Barquero, M., Alfaro, R., Esquivel, C., Durand, J.-F., and Cilas, C. (2007). Topography and Crop Management Are Key Factors for the Development of American Leaf Spot Epidemics on Coffee in Costa Rica. *Phytopathology* 97, 1532–1542.

Beer, J., Mushler, R., Kass, D., and Somarriba, E. (1998). Shade management in coffee and cacao plantations. *Agrofor. Syst.* 38, 139–164.

Chapagain K, R. (2011). Regulación internacional del uso de pesticidas: la experiencia de Costa Rica. *Rev. Costarric. Salud Pública* 20, 124–129.

Charvet, J.-P. (2013). CAFÉ, disponible sur Internet: <http://www.universalis.fr/encyclopedie/cafe/>, [consulté le 10/08/13].

Chessel, D. (2009). Signification statistique.

Chevallier, T., Woignier, T., Toucet, J., Blanchart, E., and Dieudonné, P. (2008). Fractal structure in natural gels: effect on carbon sequestration in volcanic soils. *J. Sol-Gel Sci. Technol.* 48, 231–238.

Cilas, C., Jagoret, P., Avelino, J., and Deheuvels, O. (2009). Assessing the level of organization in agroforestry systems [Poster].

Deheuvels, O., Avelino, J., Somarriba, E., and Malezieux, E. (2012). Vegetation structure and productivity in cocoa-based agroforestry systems in Talamanca, Costa Rica. *Agric. Ecosyst. Environ.* 149, 181–188.

Díaz, S., and Cabido, M. (2001). Vive la différence: plant functional diversity matters to ecosystem processes. *TRENDS Ecol. Evol.* 16, 646–655.

Félix, G.F. (2010). Sostenibilidad de la producción de café en Finca Monte Claro, 64 p.

Herrera Sirias, I.C. (2011). Root-Knot Nematodes and Coffee in Nicaragua: Management Systems, Species Identification and Genetic Diversity. Faculty of Landscape Planning, Horticulture and Agricultural Science Department of Plant Breeding and Biotechnology Alnarp, 57 p.

INRA (2013). INRA - Enjeux\_StructurantsEA, disponible sur Internet: [http://www.ea.inra.fr/Les-recherches/Presentation-EA/Enjeux\\_StructurantsEA](http://www.ea.inra.fr/Les-recherches/Presentation-EA/Enjeux_StructurantsEA), [consulté le 17/09/13].

Instituto del café del Costa Rica (2012). Informe sobre la actividad cafetalera de Costa Rica 62 p.

Lamanda, N., Roux, S., Delmotte, S., Merot, A., Rapidel, B., Adam, M., and Wery, J. (2012). A protocol for the conceptualisation of an agro-ecosystem to guide data acquisition and analysis and expert knowledge integration. *Eur. J. Agron.* 38, 104–116.

- Lemelin, A. (2004). Méthodes quantitatives des sciences sociales appliquées aux études urbaines et régionales, Montréal, INRS-UCS, édition révisée, pagination multiple.
- Lemmon, P.E. (1957). An New Instrument for Measuring Forest Overstory Density. *J. For.* 55, 667–668.
- Millennium Ecosystem Assessment (2005). Ecosystems and Human Well-being: Synthesis, Island Press, Washington, DC, 155 p.
- Mouhamadou, I.T., Touré, F., Imorou, I.T., and Sinsin, B. (2012). Indices de structures spatiales des îlots de forêts denses dans la région des Monts Kouffé. *VertigO*, 12, 3, disponible sur Internet: <http://vertigo.revues.org/13059>, [consulté le 16/09/13].
- Perfecto, I., Rice, R.A., Greenberg, R., and Van der Voort, M.E. (1996). Shade Coffee: A Disappearing Refuge for Biodiversity. *BioScience* 46, 598–608.
- Pomerada, C. (2004). L'ACCORD SUR L'AGRICULTURE (OMC): BILAN DE SA MISE EN OEUVRE, disponible sur Internet: <http://www.fao.org/docrep/008/Y4632f/y4632f0g.htm>, [consulté le 07/05/13].
- Savary, S., Teng, P.S., Willocquet, L., and Nutter, F.W. (2006). Quantification and Modeling of Crop Losses: A Review of Purposes. *Annu. Rev. Phytopathol.* 44, 89–112.
- Schroth, G., Krauss, U., Gasparotto, L., Duarte Aguilar, J.A., and Vohland, K. (2000). Pests and diseases in agroforestry systems of the humid tropics. *Agrofor. Syst.* 50, 199–241.
- Silvy, C. (1995). Quantifications... le phytosanitaire III. *Dossiers Environ.*, 274 p.
- Somarrriba, E. (1992). Revisiting the past: an essay on agroforestry definition. *Agrofor. Syst.* 233–240.
- Staver, C., Guharay, F., Monterroso, D., and Muschler, R.G. (2001). Designing pest-suppressive multistrata perennial crop systems: shade-grown coffee in Central America. *Agrofor. Syst.* 53, 151–170.
- Thibaut, T. (2009). Biodiversity an overview (Université Nice, Sophia Antipolis), 73 p.
- Thiollay, M. (1992). Influence of Selective Logging on Bird Species Diversity in a Guianan Rain Forest. *Conserv. Biol.* 6, 47–63.
- Tixier, P. (2013). Communication personnelle.
- Vonthron, S. (2012). Mise au point d'une méthode pour évaluer l'effet de l'ombrage sur les pertes de rendement occasionnées par le cortège de bioagresseurs du café au Costa Rica, 19 p.
- Watson, T. (2013). Birds protect Costa Rica's coffee crop. *Nature*, disponible sur Internet: <http://www.nature.com/news/birds-protect-costa-rica-s-coffee-crop-1.13689>, [consulté le 11/09/13].



## ANNEXES

### ANNEXE 1

# Las prácticas de los productores orgánicos como fuente de innovación para manejar las plagas y enfermedades del café

Autret Bénédicte<sup>1,2</sup>, Jacques Avelino<sup>2,3,5</sup>, Charlotte Ngo-Dinh<sup>1,2</sup>, Bruno Rapidel<sup>1,2</sup>, Philippe Tixier<sup>2,4</sup>, Clémentine Allinne<sup>1,2</sup>

1) CIRAD, UMR SYSTEM, Montpellier, France

2) CATIE, Programa de Agroforestería y Agricultura Sostenible, 7170 Turrialba, Costa Rica

3) CIRAD, UPR Bioagresseur, Montpellier, France

4) CIRAD, UR système de culture bananiers, plantains et ananas, Montpellier, France

5) IICA-PROMECAFE, Guatemala, Guatemala



Contacto: clementine.allinne@cirad.fr

## Introducción:

Una de las consecuencias del cambio climático es la modificación de la repartición de las plagas y enfermedades de los cultivos. Para hacer frente a las nuevas necesidades de controlar las plagas y enfermedades (P&E) de forma sostenible tenemos que desarrollar sistemas de cultivo resilientes con menores usos de insumos energéticamente costosos.

En Costa Rica, la producción de café orgánico representa menos de 2% de la producción total, pero suponemos que dentro de la diversidad de los sistemas orgánicos podremos encontrar situaciones con manejos de plagas eficientes y sostenibles.

## OBJECTIVOS

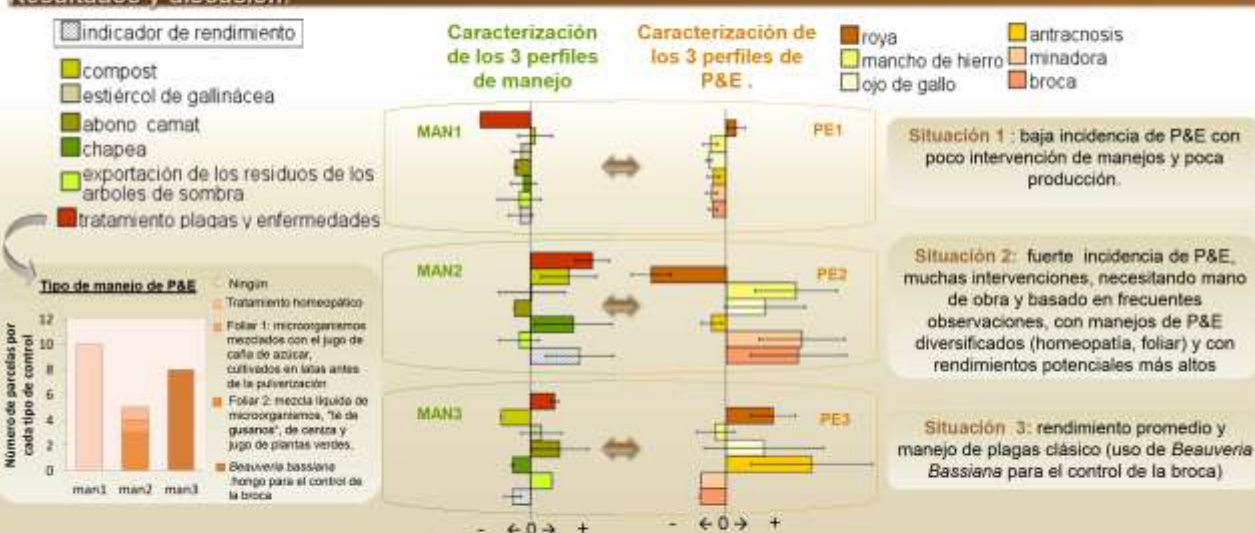
• caracterizar las prácticas y el nivel de incidencia de las plagas y enfermedades en los sistemas orgánicos

• identificar modelos de manejo sostenible que bajen el impacto de las plagas y enfermedades (P&E)

## Materiales y métodos:



## Resultados y discusión:



Los gráficos representan las diferencias con respecto al promedio de los valores centrado-reducidos de cada variable. La barras de error representa la desviación estándar.

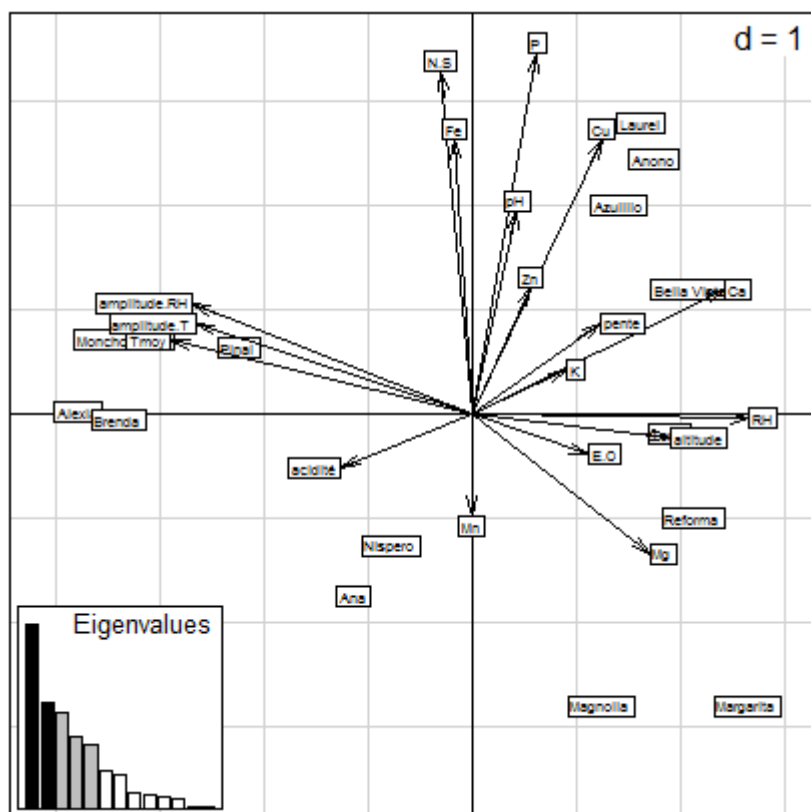
## Conclusiones:

En sistemas de café orgánicos, existen situaciones con alto rendimiento a pesar de una fuerte incidencia de plagas y enfermedades

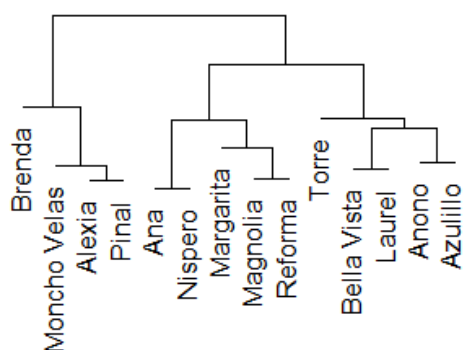
Existen manejos que permiten reducir el impacto de plagas y enfermedades sobre el rendimiento sin insumos artificiales

En los próximos años estudiaremos estos manejos para medir su eficiencia y estudiar su posibilidad de aplicación en sistemas orgánicos y convencionales.

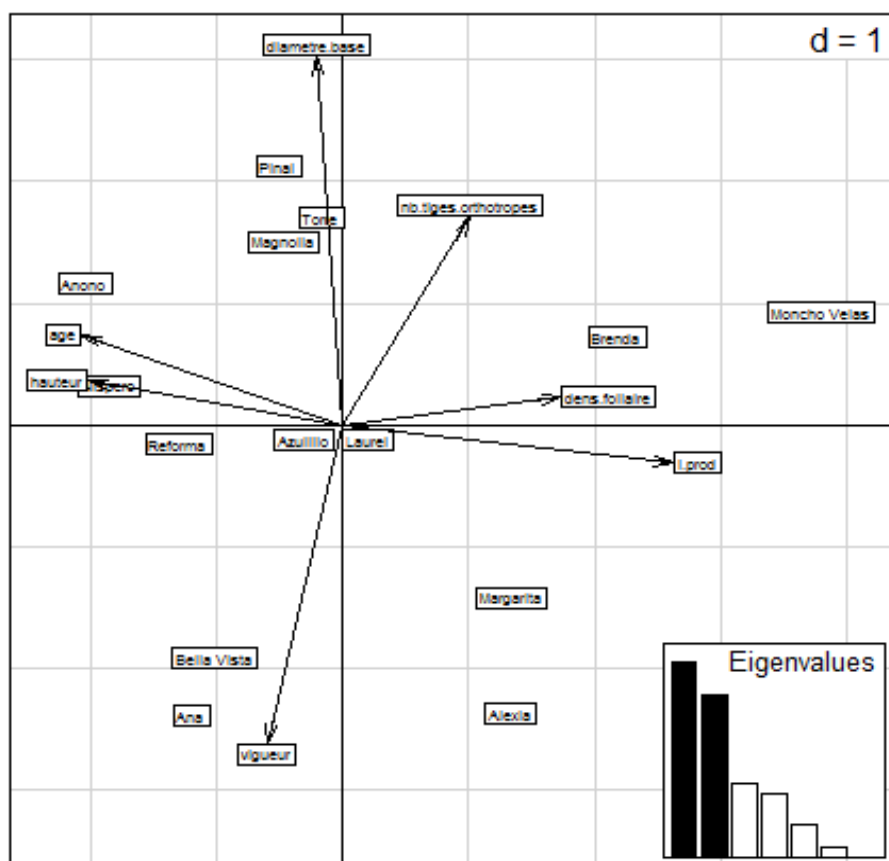
## ANNEXE 2



**Cercle de corrélation de l'ACP sur la catégorie topoclimat**  
Le premier axe explique 28,78% d'inertie, le deuxième 16,43%.

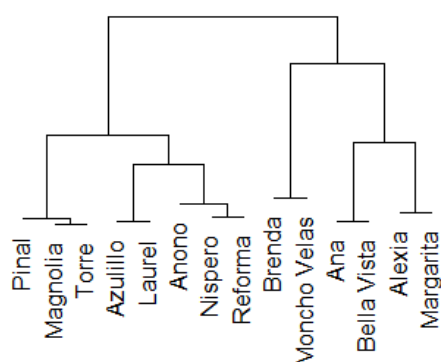


**Dendrogramme de la catégorie topoclimat**

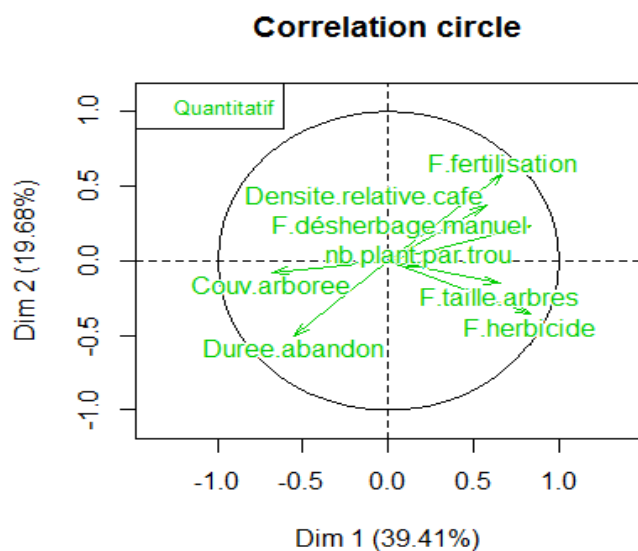


### Cercle de corrélation de l'ACP sur la catégorie des caractéristiques physiques et physiologiques des caféiers

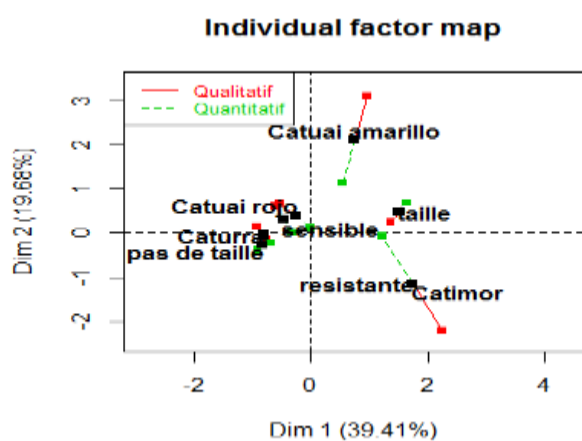
Le premier axe explique 35,89% d'inertie, et le deuxième 30,11%.



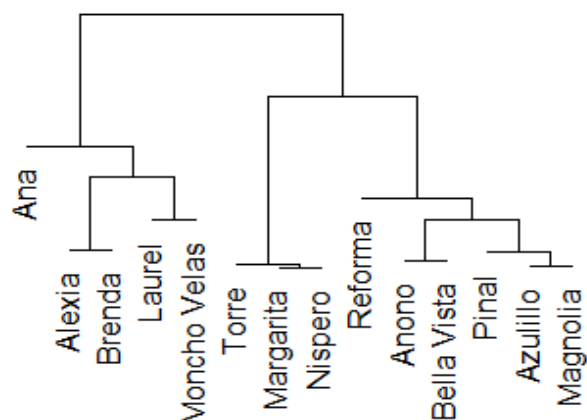
### Dendrogramme de la catégorie des caractéristiques physiques et physiologiques des caféiers



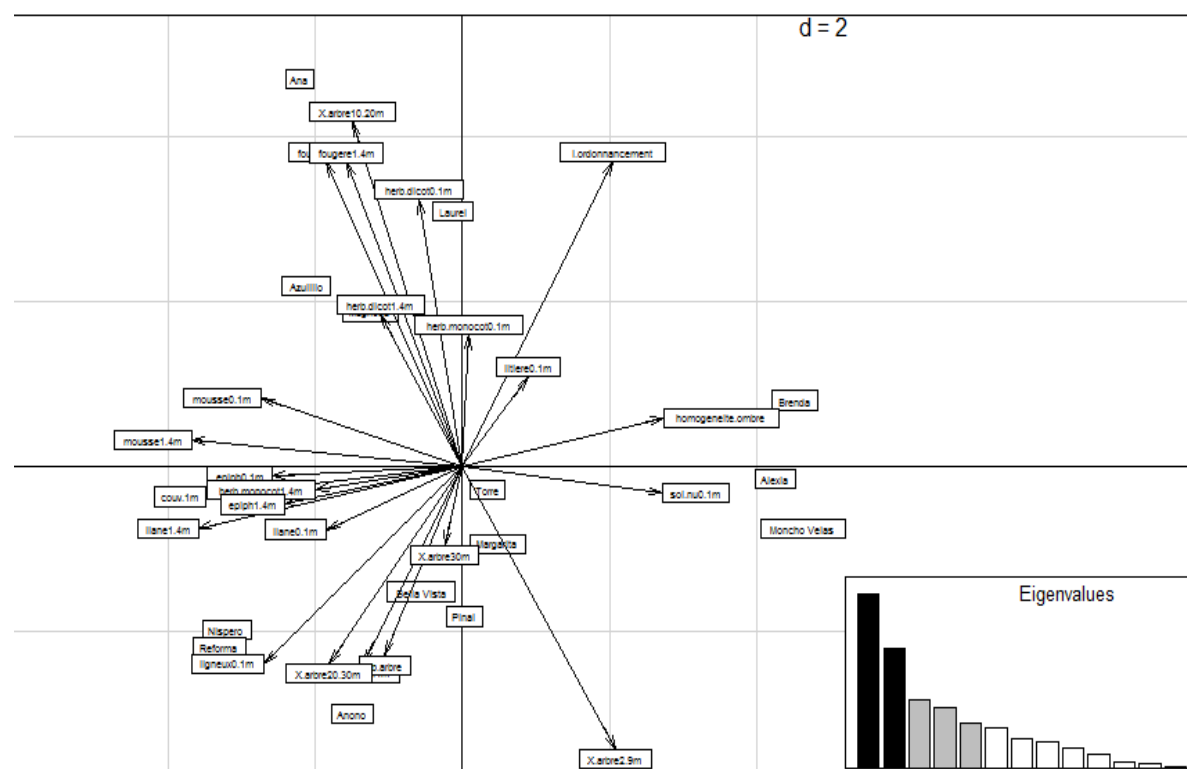
**Cercle des corrélations de l'AFM sur les pratiques culturales (variables quantitatives)**



**Carte des variables qualitatives pour l'AFM sur les pratiques culturales**

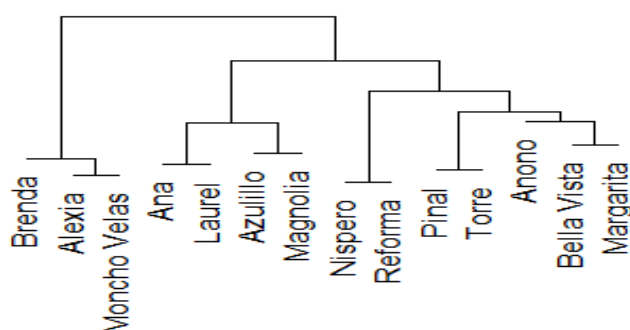


**Dendrogramme sur les pratiques culturales**

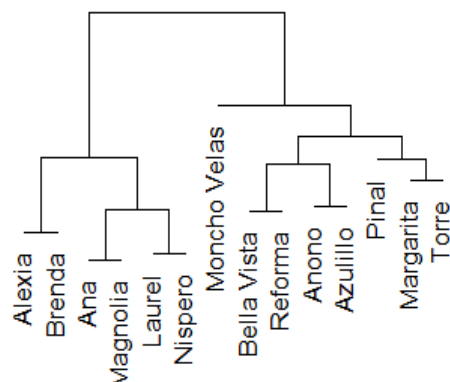


### Cercle de corrélations de l'ACP sur la structure du peuplement végétal

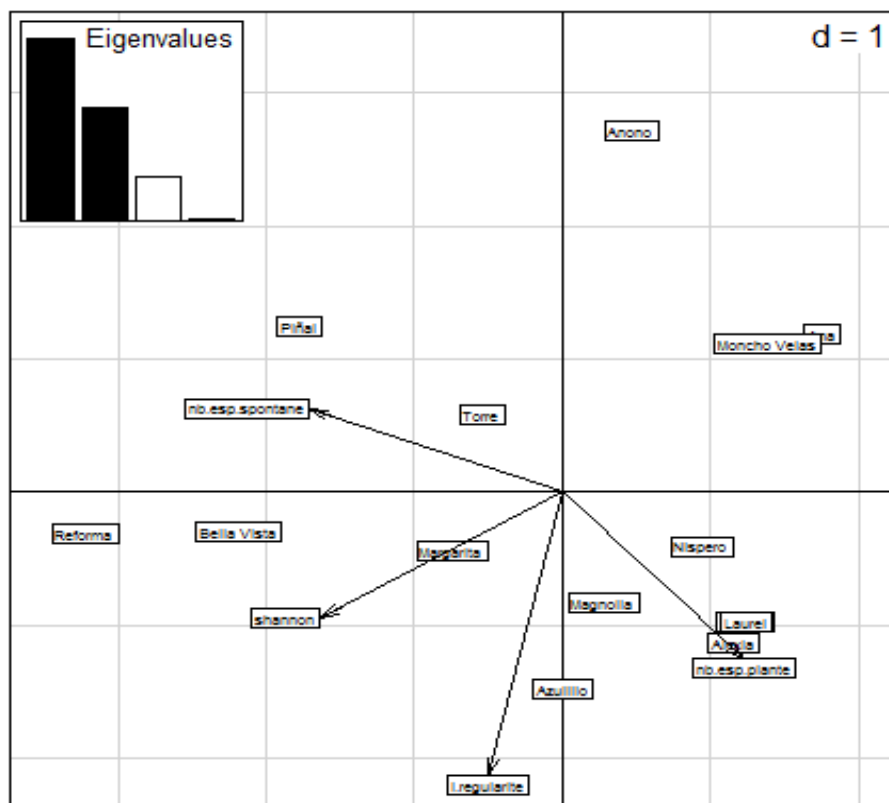
Le premier axe explique 28,28% d'inertie, le second 19,41%.



### Dendrogramme de la structure du peuplement végétal

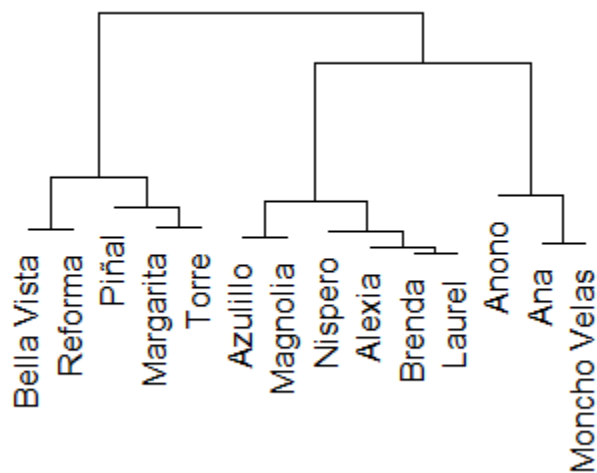


### Dendrogramme de la diversité $\beta$



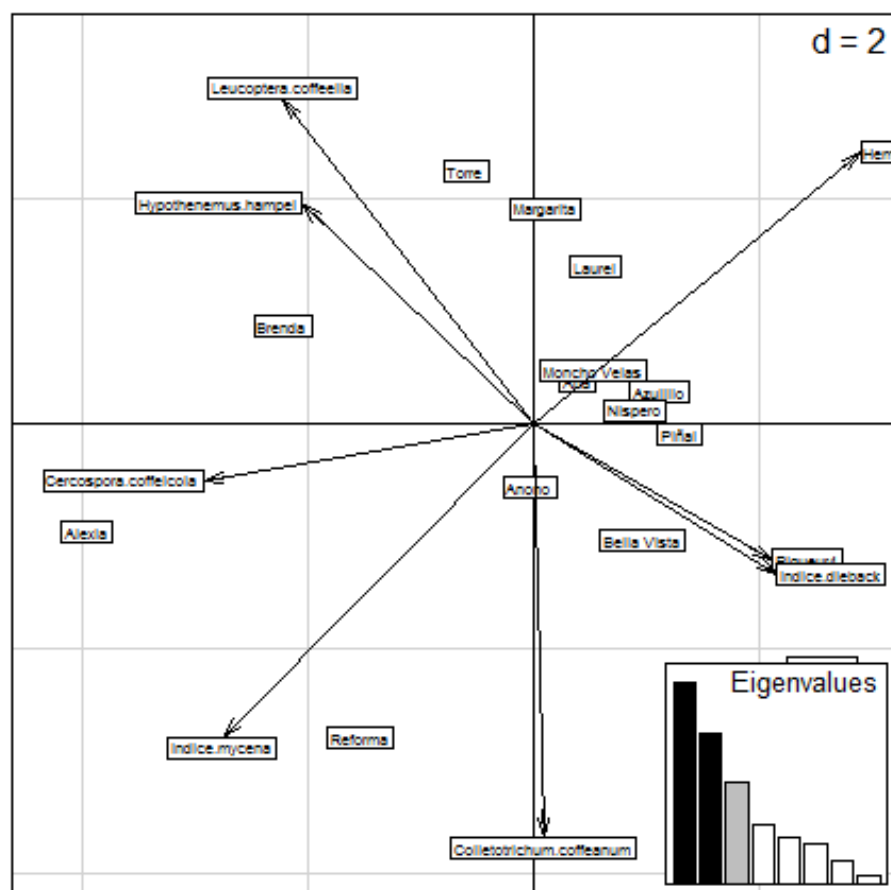
### Cercle des corrélations de l'ACP sur la diversité $\alpha$

Le premier axe explique 53,23% d'inertie, le deuxième 33,08%.

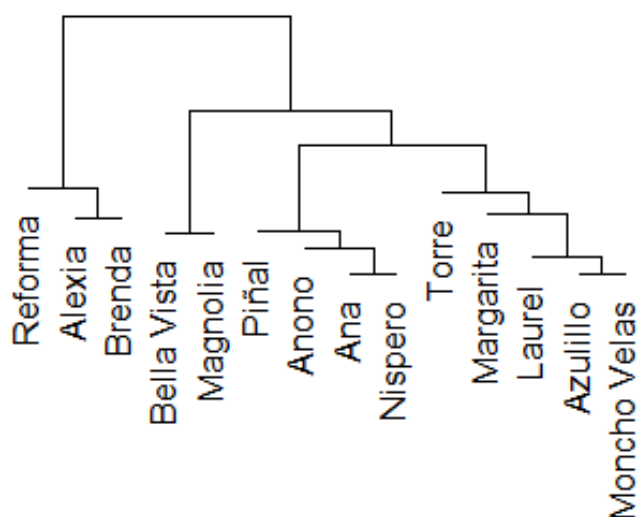


### Dendrogramme sur la diversité spécifique $\alpha$

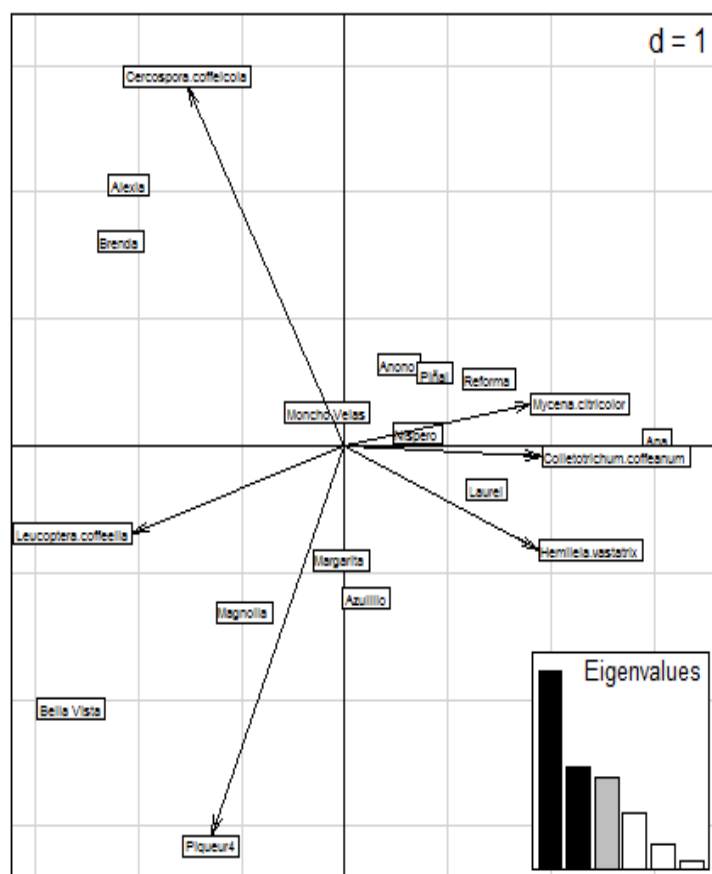




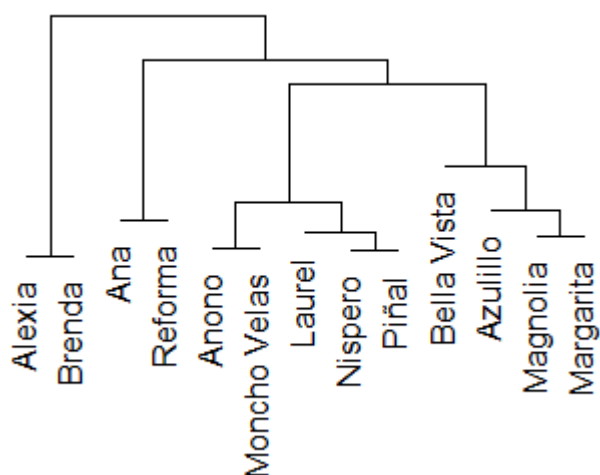
**Cercle des corrélations de l'ACP sur les bioagresseurs des caféiers**  
Le premier axe explique 31,5% d'inertie, le deuxième 23,73%.



**Dendrogramme sur les bioagresseurs des caféiers**



**Cercle des corrélations de l'ACP sur les bioagresseurs des plants témoins**  
Le premier axe explique 40,72% d'inertie, le deuxième 20,78%.



**Dendrogramme sur les bioagresseurs des plants témoins**

## RESUME

Les bioagresseurs étant un facteur limitant de la production de café au Costa Rica, les pesticides y sont utilisés de façon intensive. Dans ce contexte, un enjeu important est de maintenir la production de café, de manière durable. Une alternative aux pesticides serait le contrôle biologique des bioagresseurs. Nous posons ainsi l'hypothèse qu'il existe une relation entre la diversité biologique et la régulation des bioagresseurs, celle-ci pouvant peut-être être mise en évidence dans des milieux où il n'y a pas d'application de produits chimiques. Pour tenter d'identifier une telle relation, nous avons étudié un réseau de parcelles au Costa Rica. Ce réseau est composé de 14 parcelles dans lesquelles aucun contrôle chimique des maladies et ravageurs n'est réalisé, et qui représente un gradient de gestion et de diversité allant de la parcelle de gestion conventionnelle à la parcelle abandonnée depuis une vingtaine d'années en passant par diverses situations de gestion biologique. Dans chaque parcelle, de 4 à 24 variables ont été mesurées afin de caractériser leur topoclimat, pratiques culturales, caractéristiques physiques et physiologiques des caféiers, structure du peuplement végétal, diversité spécifique arborée ainsi que leur profil d'incidence de bioagresseurs. Une typologie a été effectuée pour chaque catégorie de variables et les associations entre les groupes identifiés lors de la typologie et les profils d'incidence des bioagresseurs ont été mises en évidence avec une analyse factorielle des correspondances. Les interactions de l'agroécosystème caféière ont été illustrées avec un modèle conceptuel. Nous observons que les profils d'incidence de bioagresseurs sont différents selon les situations (dont la diversité biologique) et le rendement. Trois situations associées à trois profils d'incidences de bioagresseurs sont observées : la situation des parcelles en usage avec peu de végétation associée, celle des parcelles abandonnées depuis peu dont la couverture arborée est intermédiaire et celles des abandonnées depuis longtemps dont la couverture arborée est très élevée. Il semblerait que la diversité intra-parcellaire et en bordure influe sur le niveau d'incidence des bioagresseurs par le biais des auxiliaires de culture et des plantes hôtes.

### Mots clés

*Coffea arabica*, topoclimat, pratiques culturales, structure végétale, diversité spécifique, profil d'incidence, régulation des bioagresseurs, typologie, Costa Rica.

Pour citer cet ouvrage : Ngo-Dinh, Charlotte, 2013, Gestion durable des systèmes agroforestiers à base de caféiers sous pression de bioagresseurs, Rapport de stage de fin d'étude, Diplôme d'ingénieur agronome, spécialité Production Végétale Durable, Montpellier SupAgro, 46 p.

Montpellier SupAgro, Centre international d'études supérieures en sciences agronomiques de Montpellier, 2 place Pierre Viala, 34060 Montpellier cedex 02. <http://www.supagro.fr>